



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE  
APLICADO A UMA FÁBRICA DE POLPAS DE FRUTA**

RAFAEL VASCONCELOS MOURA ARAÚJO

FORTALEZA

2016

RAFAEL VASCONCELOS MOURA ARAÚJO

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE  
APLICADO A UMA FÁBRICA DE POLPAS DE FRUTA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>.Dra. Ana Fabíola Leite Almeida

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A691d Araújo, Rafael Vasconcelos Moura.

Dimensionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede aplicado a uma fábrica de polpas de fruta / Rafael Vasconcelos Moura Araújo. – 2016.

91 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Rafael Vasconcelos Moura Araújo.

1. Energia Conservação. 2. Energia solar. 3. Radiação solar. I. Título.

CDD 620.1

---

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE  
APLICADO A UMA FÁBRICA DE POLPAS DE FRUTA

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>.Dra. Ana Fabíola Leite Almeida (orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>ª</sup>.Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho inteiramente às  
pessoas mais importantes da minha vida,  
meus pais e minha irmã!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, por me abençoar com inúmeras oportunidades maravilhosas e por me dar sabedoria para escolher e trilhar meus caminhos.

A minha mãe Mary-Lenny e meu pai Framartinho Carlos, por toda dedicação e apoio, que me fizeram continuar firme na minha caminhada, a minha irmã Talita Vasconcelos, por sempre me apoiar e pelo companheirismo.

A minha namorada Paula Brauer, por todo o carinho, atenção e motivação. Aos meus amigos, que caminharam juntamente comigo durante os anos de graduação, Hugo Daniel, Rodrigo Lima, Ernane Bruno, João Marcos, Caio Torres, Felipe de Deus, Victor Bruno, Josafar Junior e Vilnardo Alves, assim como, meus amigos de infância Rodrigo Rodrigues e Vitor Macedo e ,principalmente, meu melhor amigo Pedro Gabriel e seu pai Ribamar Pontes.

A minha orientadora professora Fabíola, pela sua paciência, empenho, cobranças e palavras de motivação.

Ao coordenador do curso de Engenharia Mecânica, professor Luiz Soares e ao assistente de coordenação, Hélio, pela prontidão e auxílio na resolução de diversos tipos de problemas. A todos os professores do Departamento de Engenharia que compartilharam seus conhecimentos e experiências, indispensáveis à minha formação acadêmica.

A CAPES, pela oportunidade de intercâmbio, que me proporcionou crescimento tecnológico, humano e social, de grande importância para minha formação.

A empresa Podium Engenharia, por todos os ensinamentos e experiências vividas durante o período de estágio.

“Faça o necessário,  
depois o possível, e de repente,  
você estará fazendo o impossível.”

(Francisco de Assis)

## RESUMO

Diante da grande ascensão do mercado de energia fotovoltaica, em paralelo com os incentivos e regulamentação deste setor, apresentam-se os fundamentos dos conceitos mais importantes deste tema e a metodologia para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. As constantes secas, principalmente na região nordeste, vêm ocasionando o agravamento da crise energética no país, pois as fontes hidráulicas são responsáveis por cerca de 65% da produção de energia nacional. Assim, a crise nacional energética vem castigando pequenos e médios consumidores, cujos faturamentos de energia apresentam constantes aumentos significativos. Como solução, as energias renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço nos cenários das regiões brasileiras. Prova disto, a energia fotovoltaica teve crescimento recorde em 2015 e começa 2016 com perspectiva de crescer 300%. Assim, este trabalho tem como objetivo orientar aqueles que buscam soluções viáveis para diminuir seus custos com energia elétrica investindo em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). São apresentadas detalhadamente as principais informações relevantes para correto dimensionamento de um SFCR. Com intuito de realizar um dimensionamento real, apresenta-se um SFCR projetado para atender 50% do consumo de uma fábrica de polpas de fruta, localizada na cidade de Caucaia, Ceará. O SFCR dimensionando demonstrou-se capaz de fornecer 49,62 % do consumo médio demandado pela unidade consumidora, além disso, estimou-se que o tempo de retorno para o investimento necessário à sua instalação será no 9º ano de operação do sistema.

**Palavra Chave:** Dimensionamento. Energia solar. Sistema fotovoltaico conectado à rede.



## ABSTRACT

Facing the large rise of photovoltaics market, in parallel to the incentives and regulation of this sector, this work presents the fundamentals of the most important concepts of this topic and the methodology for dimensioning of on-grid photovoltaic systems. The frequent droughts, especially in the northeast of Brazil, have caused the worsening of energy crisis in the country because the hydraulic sources are responsible for about 65% of the national energy production. In this circumstance, the national energy crisis is beating small and medium consumers, whose energy billings have showed significant increases. As a solution, renewable energy sources have been gaining more and more space in Brazilian regions scenarios. A proof of this is that the photovoltaic energy had a record growth in 2015 and starts 2016 with perspective to grow up 300%. This work aims to guide those who seek viable solutions to lower their electricity costs by investing in on-grid photovoltaic systems. Are shown in detail the main relevant information for the correct sizing of a on-grid photovoltaic system. In order to implement a real design, it presents a on-grid photovoltaic system designed to meet 50% of the consumption of a fruit pulp factory, located in Caucaia, Ceará. The on-grid photovoltaic system scaling demonstrated to be capable of providing 49.62% of the average consumption demanded by the consumer unit, in addition, it was estimated that the payback time for the investment required for its installation will be in the ninth year of the system operation.

**Keywords:** Dimensioning. Solar energy. On-grid photovoltaic system.

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta tensão
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
AIE	Agência Internacional de Energia
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
COELCE	Companhia Energética do Ceará
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito
DPS	Dispositivo de proteção contra surto
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
ISGPH	Irradiação Solar Global no Plano Horizontal
Imp	Corrente de máxima potência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
HSP	Horas de sol pico por dia
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
MF	MóduloFotovoltaico
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
SF	Sistema Fotovoltaico
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
TE	Tarifa de Energia Elétrica
UC	Unidade Consumidora

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição solar da terra.....	24
Figura 2- Esquema do movimento da Terra ao longo de um ano.....	25
Figura 3- Ângulos geométricos para tecnologia solar.....	25
Figura 4 - Instrumentos de medição (a) Heilógrafo (b) Actnógrafo.....	30
Figura 5- Instrumentos de medição (c) Piroheliômetro (d) Piranômetro Fotovoltaico.....	31
Figura 6 - Ilustração do efeito fotovoltaico na junção P-N de uma célula ligada a um circuito elétrico.....	32
Figura 7- Células de silício monocristalino e policristalino..	34
Figura 8 -Partes constituintes de um módulo fotovoltaico.....	34
Figura 9 -Esquema de um arranjo em paralelo.....	38
Figura 10 - Esquema de um arranjo em série.....	39
Figura 11 - Configuração representativa de uma associação mista.....	40
Figura 12 - Área disponível para instalação dos MFs.....	49
Figura 13 - Faturamento de energia da fábrica de polpas – Abril 2016.....	50
Figura 14 — Simulação do SFCR no software PVsyst.....	76
Figura 15 — Simulação do balanço de carbono.....	77

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –Fontes de geração da energia elétrica mundial 2014.....	19
Gráfico 2 –Percentual de mudanças de fontes de energia elétrica 2013- 2014.....	20
Gráfico 3 – Emissão de CO <sub>2</sub> por KWh de geração de energia.....	21
Gráfico 4 –Crescimento do uso mundial de energia fotovoltaica.....	21
Gráfico 5 –Preço das células fotovoltaicas 1977-2015.....	22
Gráfico 6 –Gráfico das horas de pico.....	29
Gráfico 7 – Curva Corrente – Tensão.....	36
Gráfico 8 – Variação da corrente e tensão de um MF em função de sua temperatura de operação.....	36
Gráfico 9– Variação da corrente e tensão de um MF em função da irradiação solar.....	37
Gráfico 10– Irradiação solar para localidades próximas à Fábrica de Polpas.....	48
Gráfico 11– Temperaturas médias do município de Caucaia.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais informações da conta de energia.....	51
Tabela 2 - Principais informações do módulo fotovoltaico.....	53
Tabela 3-Principais informações do inversor selecionado.....	56
Tabela 4- Cálculos preliminares.....	58
Tabela 5 - Configuração preliminar do inversor.....	59
Tabela 6- Disponibilidade solar para inclinação de 10° – Município de Caucaia-CE.....	63
Tabela 7 - Coeficientes de perdas consideradas pelo projetista.....	65
Tabela 8 - Limites reais do SFCR.....	68
Tabela 9 - Configurações corrigidas dos inversores e MF.....	68
Tabela 10- Dados finais do Projeto.....	69
Tabela 11- Custo total de implantação do SFCR.....	70
Tabela 12 – Custo da manutenção.....	72
Tabela 13 – Análise financeira si projeto fotovoltaico da fábrica de polpas.....	73
Tabela 14 – Dados finais do projeto.....	75

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
<b>3. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>19</b>
<b>4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>23</b>
4.1 Radiação Solar.....	23
4.2 Ângulos geométricos solares.....	25
4.3 Irradiância solar.....	28
4.4 Instrumentos de medição.....	30
4.5 Células fotovoltaicas.....	31
4.5.1 Células de silício monocristalinas.....	32
4.5.2 Células de silício policristalino.....	33
4.5.3 Considerações importantes.....	33
4.6 Módulos fotovoltaicos (MF).....	34
4.6.1 Propriedades elétricas.....	35
4.6.2 Curva de corrente vs. Tensão (curva I – V).....	35
4.7 Associação das Células e Módulos Fotovoltaicos.....	38
4.7.1 Associação em paralelo.....	38
4.7.2 Associação em série.....	39
4.7.3 Associação mista.....	40
4.8 Sistema fotovoltaico (SF).....	41
4.8.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFCR).....	41
4.8.2 Componentes de um SFCR.....	42
4.8.2.1 Caixa de junção dos MF.....	42
4.8.2.2 Caixa de interruptor principal.....	42
4.8.2.3 Caixa de isolamento CA e CC.....	43
4.8.2.4 Estruturas de suporte.....	43

4.8.2.5 Inversor Interativo.....	43
4.8.2.6 Medidor Bidirecional.....	44
4.8.2.7 Cabos CA e CC.....	44
4.8.2.8 Sistemas de proteção.....	44
4.9 Referências normativas.....	45
<b>5. FÁBRICA DE POLPAS DE FRUTA.....</b>	<b>46</b>
<b>6. DIMENSIONAMENTO DO SFCR.....</b>	<b>46</b>
6.1 Visita e levantamento das características do local da instalação.....	47
6.2 Descrição do local e disponibilidade do recurso solar.....	47
6.3 Área disponível para instalação e orientação dos módulos.....	48
6.4 Análise do faturamento de energia da Fábrica de polpas.....	49
<b>7. CÁLCULO DE POTÊNCIA DO SFCR.....</b>	<b>52</b>
<b>8. DEFINIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>53</b>
8.1 Cálculo do número de módulos fotovoltaicos.....	54
8.2 Cálculo da área total ocupada pelos MFs.....	54
<b>9. ANÁLISE DO INVERSOR.....</b>	<b>55</b>
9.1 Análise do número máximo de MF conectados ao inversor.....	56
9.2 Análise da corrente de entrada do inversor.....	57
9.2.1 Número máximo strings em paralelo.....	57
9.3 Análise da tensão de entrada do inversor.....	57
9.3.1 Número máximo de MF em série por string.....	57
9.3.2 Número mínimo de MF em série por string.....	58
<b>10. DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR.....</b>	<b>58</b>
<b>11. ANÁLISE DE PERDAS E AJUSTES APLICÁVEIS AOS SFCR.....</b>	<b>59</b>

11.1 Perdas por fator de temperatura.....	60
11.1.1 Compensação por fator de temperatura da potência de pico.....	60
11.1.2 Compensação por fator de temperatura da tensão.....	61
11.1.3 Compensação por fator de temperatura da corrente.....	62
11.2 Correção do valor da radiação solar.....	63
11.3 Outras perdas importantes.....	64
11.3.1 Sombreamento.....	64
11.3.2 Sujeira nos MFs.....	64
11.3.3 Compensação de perdas de conversão CC/CA.....	64
11.4 Redimensionamento do SFCR.....	65
11.4.1 Potência corrigida do SFCR.....	65
11.4.2 Cálculo do número de MF corrigido.....	65
11.4.3 Número máximo corrigido de MF por inversor.....	66
11.4.4 Número máximo de strings em paralelo corrigido.....	66
11.4.5 Número máximo corrigido de MF conectados por string.....	67
11.4.6 Número mínimo corrigido de MF conectados por string.....	67
<b>12. ANÁLISE DE CUSTOS.....</b>	<b>70</b>
12.1 Custo total do SFCR.....	70
12.2 Custo de manutenção.....	71
12.3 Valor da energia gerada.....	72
<b>13. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
<b>14. CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>15. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>



# 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia sempre esteve presente no desenvolvimento sócio econômico mundial. Após a revolução industrial, a crescente necessidade de obtenção e uso de formas de energia mais potentes incorporaram as energias fósseis como o petróleo e o carvão mineral. No entanto, após anos de consumo elevado destes recursos para produção de energia elétrica, as consequências estão cada vez mais visíveis. Evidências científicas já provaram que esse modelo energético, além de finito, é também extremamente danoso ao meio ambiente.

As perspectivas comprovam que o consumo energético mundial só tende a crescer cada vez mais. Segundo Worldometers (2016), a população mundial em 2050 tende a ultrapassar 9,6 bilhões de habitantes, o que implica em um consumo anual de mais de 28 mil TWh de energia, 8 mil TWh a mais que o consumo atual.

Diante deste consumo elevado, as energias renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço no cenário mundial, suprimindo o consumo energético e, principalmente, preservando o meio ambiente, tendo em vista que estes recursos ocasionam danos insignificativos ao meio ambiente se comparados aos combustíveis fósseis.

A tecnologia fotovoltaica é vista por muitos como um caminho ideal para a geração de energia através de uma fonte inesgotável e não poluente. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a energia solar poderá responder por cerca de 11% da oferta mundial de energia elétrica em 2050, atingindo uma área de 8 mil km<sup>2</sup> ocupada por painéis solares.

Em relação ao potencial de produção de energia solar, o Brasil possui uma localização geográfica privilegiada, principalmente a região nordeste, local o qual possui maiores valores de irradiação global, com maior média e a menor variabilidade anual. Segundo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), as taxas médias de insolação diária dentro do território nacional variam entre 4500 e 6000 Wh/m<sup>2</sup>. Para efeitos de comparação, a Alemanha, um dos líderes mundiais em capacidade fotovoltaica instalada, com um total de 40 GW no início de 2016, não ultrapassa 3500 Wh/m<sup>2</sup> em apenas uma faixa limitada do seu território.

Tendo em vista esse potencial, recentemente, vários incentivos foram estabelecidos com o objetivo de estimular a geração de energia pelos próprios consumidores (residencial, comercial, industrial e rural), com base em fontes renováveis, em especial a fotovoltaica. Dentre os principais incentivos se destaca a Resolução nº 690 estabelecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que busca agregar energia elétrica ao sistema mediante a utilização do potencial de

geração existente em Unidade Consumidora (UC), para minimizar os riscos de desabastecimento de energia elétrica.

A partir deste ponto, o uso de energia fotovoltaica prosperou no país, e, atualmente, essa tecnologia se encontra no início de uma nova fase, onde não são necessários dispositivos para armazenar a energia produzida, o que elevava bastante o custo da produção de energia por meio de sistemas fotovoltaicos. Este novo método é denominado sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR).

Diante da grande ascensão dos SFCR no Brasil, surge a necessidade do conhecimento técnico e especializado deste sistema. Assim, o desenvolvimento de um projeto fotovoltaico aplicado, proposto por este trabalho, pode trazer um maior conhecimento e esclarecimento sobre de dimensionamento fotovoltaico.

Segundo o Ministério de Minas e Energia, em 2018, o Brasil deverá estar entre os 20 países com maior geração de energia solar e que em 2050, cerca de 18% dos domicílios nacionais contarão com geração fotovoltaica (8,6 TWh), ou 13% da demanda total de eletricidade residencial.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica para implantação de um sistema fotovoltaico de energia elétrica integrada a uma fábrica de polpas de fruta, dimensionando os principais parâmetros técnicos com base em procedimentos propostos pela literatura e em dados coletados durante visita in loco.

### 2.2 Objetivos específicos

Projetar um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) para atender a demanda do consumo de energia elétrica de uma fábrica de polpas de fruta, desenvolvendo as seguintes atividades:

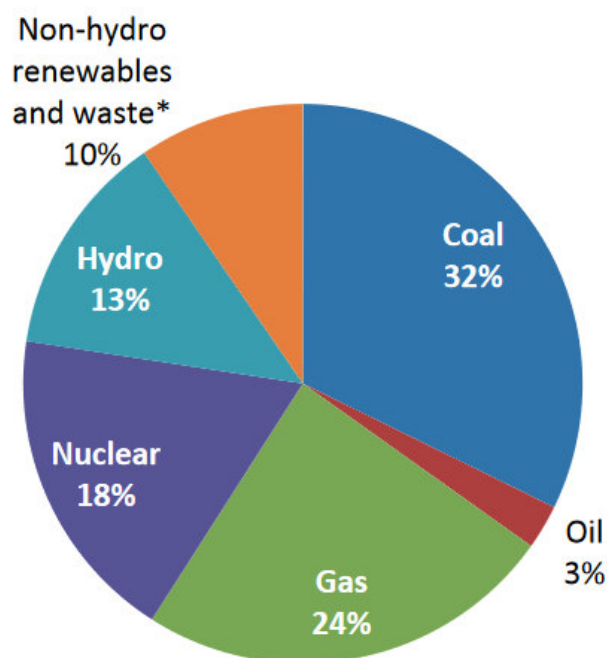
- Analisar o faturamento de energia elétrica da unidade consumidora;
- Analisar a área e disponibilidade solar do local de instalação do sistema por meio de visita in loco.
- Calcular a energia de compensação do SFCR;
- Dimensionar os componentes do SFCR, módulos, inversores e medidor bidirecional de acordo com as normas brasileiras;
- Elaborar uma análise financeira simplificada do projeto e calcular seu tempo de *payback*;
- Elaborar uma simulação computacional para verificar a viabilidade do SFCR dimensionado.

### 3 JUSTIFICATIVA

O consumo de energia elétrica tem crescido muito nas últimas décadas. Segundo IEA, em 1980, o mundo consumia anualmente cerca de 7.000 TWh de eletricidade. Já, em 2050, este número tende a ultrapassar 28 mil TWh. Para produzir essa quantidade de energia, seriam necessárias 230 usinas hidrelétricas, como a binacional Itaipu ou 1.000 usinas nucleares como a de Fukushima, no Japão.

Diante desta demanda de energia, os combustíveis fósseis, petróleo, gás e carvão, ainda são os líderes de produção mundial de eletricidade, produzindo cerca de 60% da energia no planeta, Gráfico 1. No entanto, as consequências da utilização destes recursos estão cada vez mais presentes no cenário mundial, principalmente em relação à emissão de gases poluentes no meio ambiente. Também é importante destacar, a ameaça de extinção destes recursos, caso o consumo elevado continue crescendo.

Gráfico 1— Fontes de geração da energia elétrica mundial 2014.



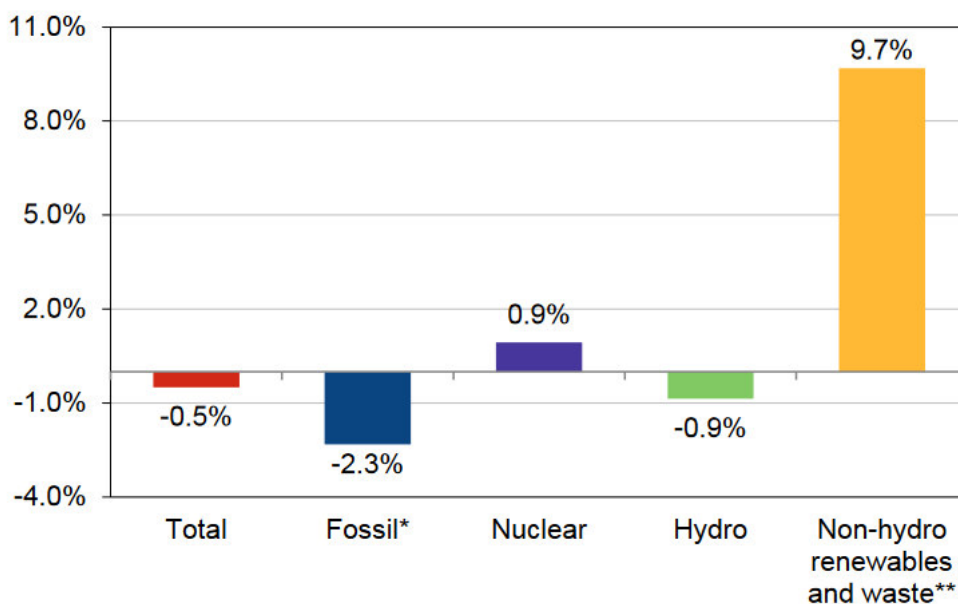
*\*Includes geothermal, solar, wind, tide, biofuels, waste and heat.*

Fonte: Agência Internacional de Energia (AIE).

Tendo em vista este cenário, as autoridades mundiais buscam providências imediatas para conscientizar e alertar a população sobre a realidade do planeta. Para isto, conferências mundiais como: Kyoto, RIO+10, COP 21, dentre outras, foram realizadas para definir metas e soluções para combater os impactos ambientais.

Assim, devido às inúmeras vantagens, as quais se destacam a produção de energia limpa e fontes inesgotáveis, as energias renováveis são consideradas um dos fatores essenciais para substituírem os recursos fósseis, reduzindo a emissão de gases poluentes e preservando a escassez dos recursos fósseis.

Gráfico 2— Percentual de mudanças de fontes de energia elétrica 2013- 2014.



\*Fossil includes coal, peat, oil shale, oil and gas.

\*\*Includes geothermal, solar, wind, tide, biofuels, waste and heat.

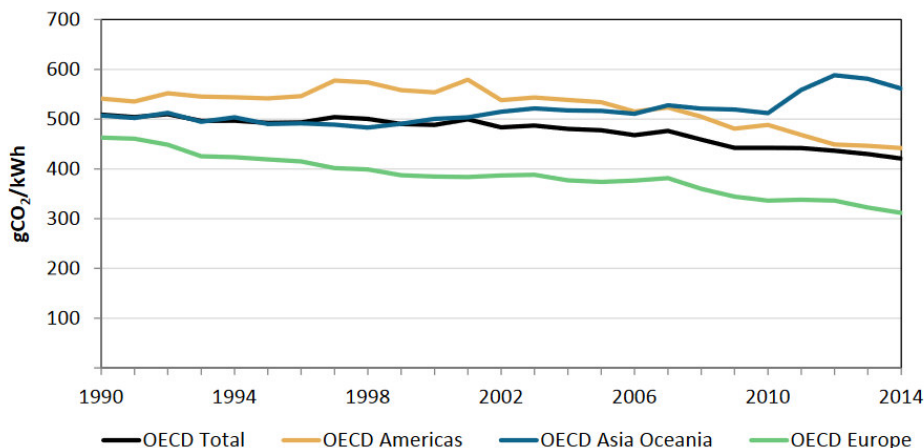
Fonte: Agência Internacional de Energia (AIE)

O gráfico 2 ilustra o crescimento elevado da produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis, as quais se destacam energia solar e eólica que cresceram 26% e 9% respectivamente em apenas um ano. O que acarretou em um decréscimo de 2% na produção de energia por meio de recursos fósseis.

Diante destas mudanças, os resultados já são perceptíveis. Com o investimento em energias renováveis em todo o mundo, a emissão de CO<sub>2</sub> ocasionada

pela produção de energia elétrica reduziu significativamente em todos os continentes, como consta o Gráfico 3:

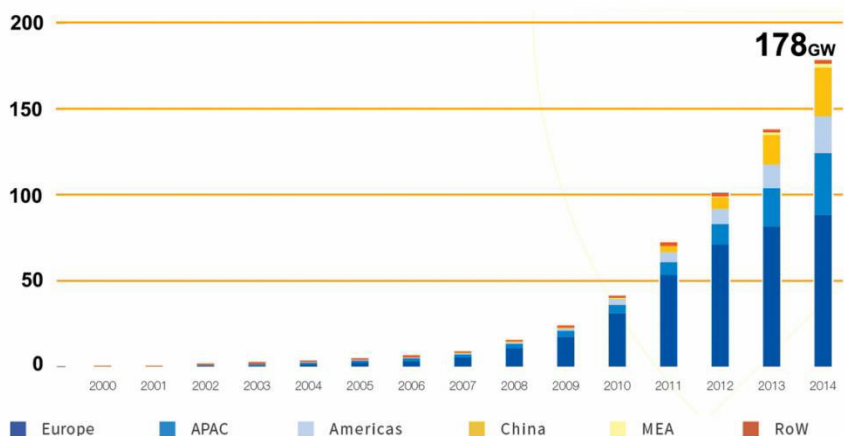
Gráfico 3— Emissão de CO<sub>2</sub> por KWh de geração de energia.



Fonte: Agência Internacional de Energia (AIE).

Com uma produção de aproximadamente 180 GW instalados globalmente, a energia fotovoltaica é, agora, depois da hidráulica e eólica, a terceira mais importante fonte de energia renovável em termos de capacidade instalada mundialmente. No Gráfico 4, pode-se observar o crescimento mundial de energia fotovoltaica ao longo dos últimos anos.

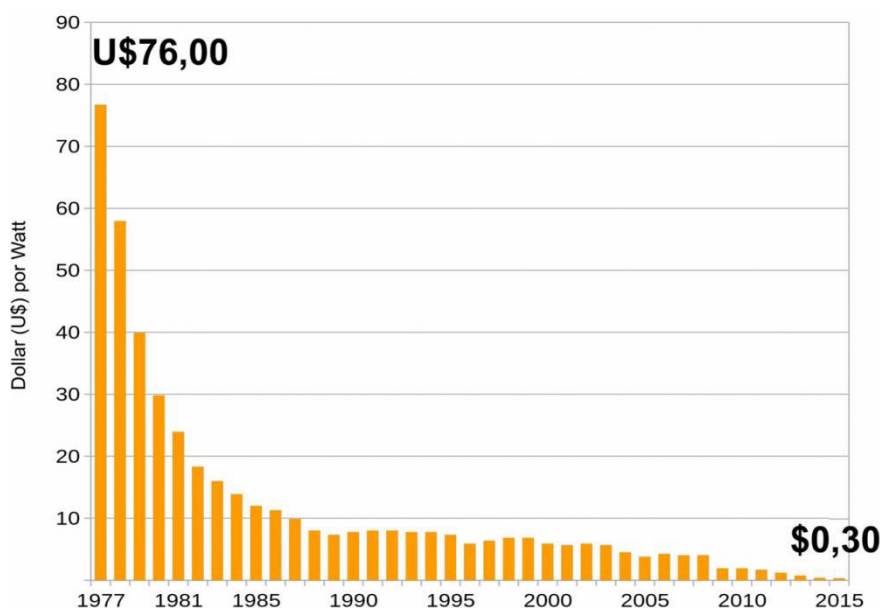
Gráfico 4— Crescimento do uso mundial de energia fotovoltaica.



Fonte: Portal Solar.

Tendo em vista o alto potencial da energia solar fotovoltaica e o aumento mundial da demanda deste sistema, investidores e pesquisadores vêm trabalhando em busca de avanços de tecnologia e métodos para redução dos custos para implantação deste sistema. Assim, o preço da energia fotovoltaica tem diminuído de forma constante ano após ano. Em 2015, as células fotovoltaicas atingiram os seus menores preços históricos, chegando ao patamar de U\$ 0,30/Watt. O Gráfico 5, ilustra o decréscimo do preço das células fotovoltaicas, principal componente dos módulos fotovoltaicos (MF).

Gráfico 5—Preço das células fotovoltaicas 1977-2015.



Fonte: Portal Solar.

## 4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os assuntos abordados neste capítulo são de extrema relevância para compreender a importância e os conceitos essenciais sobre energia solar e sistema fotovoltaico conectado à rede. O capítulo divide-se em: revisão básica sobre radiação solar, caracterização do SFCR e seus componentes, desempenho e perdas associadas ao projeto fotovoltaico, conceitos importantes sobre faturamento de energia e referências normativas aplicadas aos projetos de energia solar no Brasil.

Este capítulo desempenha um papel fundamental para que se compreendam os cálculos e considerações feitas para dimensionamento do SFCR, assim como uma análise financeira do sistema.

### 4.1 Radiação Solar

O Sol fornece energia na forma de radiação, que é a base de toda a vida na Terra. No centro do Sol, a fusão transforma núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio. Durante este processo, parte da massa é transformada em energia. Assim, o Sol é um enorme reator de fusão.

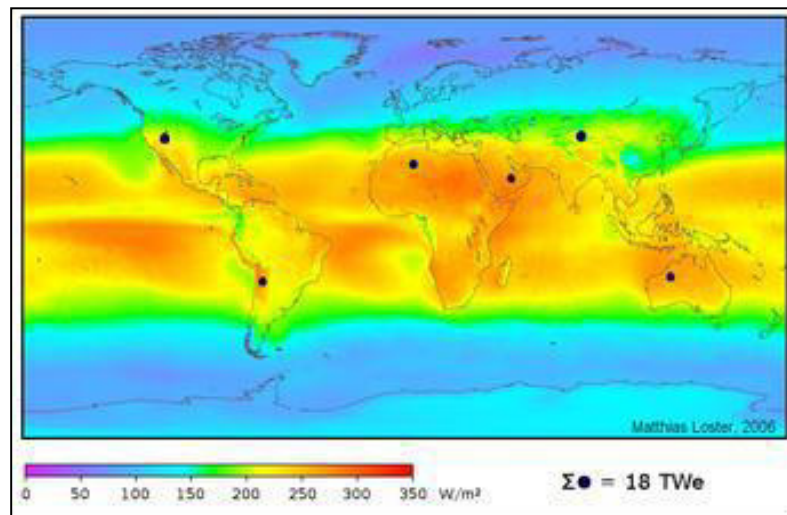
Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra, apenas uma mínima parte (aproximadamente duas partes por milhão) da radiação solar emitida atinge a superfície da Terra. Esta radiação corresponde a uma quantidade de energia de  $1 \times 10^{18}$  kWh/ano.

Segundo Foster, Ghassemi e Costa (2009), apesar desta pequena parcela da radiação que atinge a superfície terrestre, a radiação solar que chega a terra em uma hora ( $4,3 \times 10^{20}$  J) é maior que toda a energia consumida no planeta em um ano ( $4,1 \times 10^{20}$  J). Assim, seria necessário apenas 0,01% desta energia para satisfazer a demanda energética total da humanidade.



A Figura 1 apresenta a Distribuição de energia solar na Terra. Os pontos pretos representam a área necessária para suprir toda a demanda de energia do planeta Terra.

Figura 1—Distribuição solar da terra.

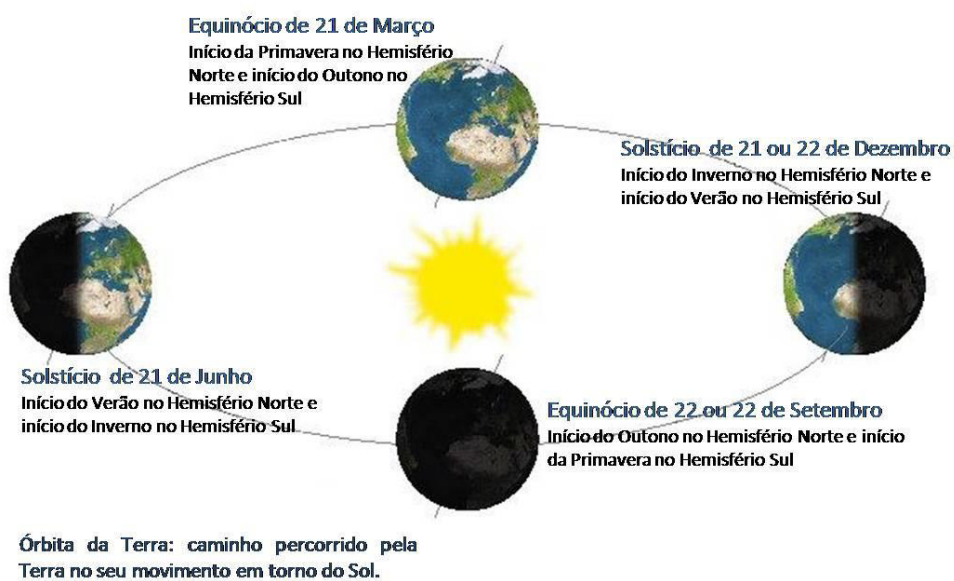


Fonte: International Energy Agency (IEA).

A quantidade e a intensidade de energia solar que irradia a superfície terrestre são diretamente relacionadas com a relação geométrica entre o Sol e a Terra, a qual varia em função de fatores como: data, estação do ano, latitude e longitude do local, posição do sol e hora do dia.

Outros fatores muito importantes são os movimentos de rotação e translação da Terra, assim como a sua trajetória elíptica em torno do Sol e sua inclinação entre o eixo de rotação e o plano perpendicular ao plano elíptico. Essas condições são consequências diretas sobre os parâmetros aplicáveis a geração fotovoltaica, tais como a duração do dia e as estações do ano, como consta na Figura 2.

Figura 2—Esquema do movimento da Terra ao longo de um ano.

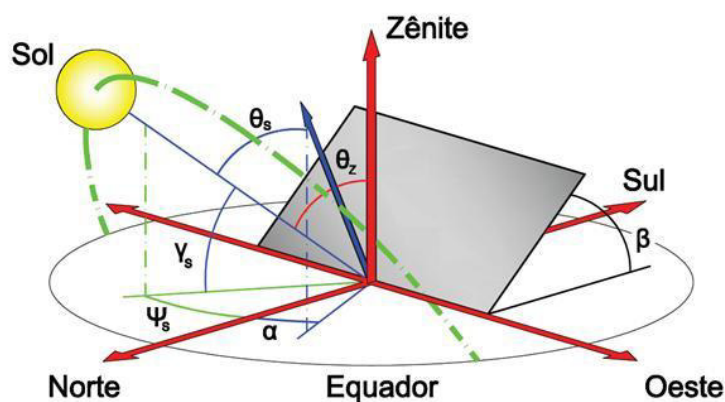


Fonte: Revista Electrónica Ciência Viva.

## 4.2 Ângulos geométricos solares

A fim de que haja um melhor aproveitamento da energia oriunda do Sol, é necessário que se conheçam algumas relações geométricas, descritas por alguns ângulos, Figura 3, que devem ser definidos, entre os raios solares e a superfície terrestre. A seguir serão identificados cada um destes.

Figura 3—Ângulos geométricos para tecnologia solar.



Fonte: PINHO, T. JOÃO; Sistemas Híbridos, Soluções Energéticas para a Amazônia.

➤ Declinação solar ( $\delta$ ): é o ângulo compreendido entre o plano do equador terrestre e o plano da eclíptica, varia ao longo do ano entre  $-23,45^\circ$  e  $23,45^\circ$ . A equação 1 permite calcular a declinação solar com grande precisão em qualquer dia do ano:

$$\delta = [A - B\cos\Omega + C\sin\Omega - D\cos(2\Omega) + E\sin(2\Omega) - F\cos(3\Omega) + G\sin(3\Omega)] \frac{1}{\pi} \quad (1)$$

Cujo:

$\Omega$ , em radianos, é dado pela equação 2:

$$\Omega = \frac{2\pi \times (d_n - 1)}{365} \quad (2)$$

Os valores das constantes correspondem a:

$$A=0,0066918 \quad B=0,399912 \quad C=0,070257$$

$$D=0,0067580 \quad E=0,000907 \quad F=0,002697$$

$$G=0,0014800$$

$d_n$  corresponde o dia juliano do ano,  $d_n < 365$ , ou seja, de 01 de janeiro até 31 de dezembro.

➤ Altitude solar ( $\alpha_s$ ): medida entre a projeção de feixe de radiação do sol na horizontal e a posição do sol. Quando o sol está na horizontal,  $\alpha_s=0^\circ$  e quando está diretamente em cima da superfície,  $\alpha_s= 90^\circ$ . A altitude solar pode ser calculada pela Equação 3:

$$\sin(\alpha_s) = \sin(\phi) \times \sin(\delta) + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(\omega) \quad (3)$$

Cujo:

$\phi$  representa a latitude do local, em graus.

➤ Ângulo horário ( $\omega$ ): representa a distância angular entre a posição do sol em um determinado momento e sua posição mais alta para esse dia ao atravessar o meridiano local ao meio dia solar. Como a Terra rotacional a cada 24 h, aproximadamente, o ângulo horário muda  $15^\circ$  a cada hora e se move  $360^\circ$  durante o curso do dia. Portanto, ele é definido  $0^\circ$  ao meio dia solar, tem valores negativos antes de atravessar o meridiano local e tem valores positivos após o meridiano local. Este ângulo pode ser calculado pela Equação 4:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\text{tg}\phi \times \text{tg}\delta) \quad (4)$$

➤ Ângulo Zenital ( $\theta_z$ ): Distância angular entre o zênite (linha perpendicular ao horizonte do local) e a posição do Sol. Desta forma,  $\alpha_s + \theta_z = 90^\circ$ .

O ângulo zenital pode ser calculado pela Equação 5:

$$\cos(\theta_z) = \text{sen}(\phi) \times \text{sen}(\delta) + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(\omega) \quad (5)$$

Segundo Foster, Ghassemi e Costa (2009), para efetuar o cálculo da radiação incidente em um coletor solar horizontal, três outros ângulos devem ser definidos, o ângulo de inclinação da superfície ( $\beta$ ), o ângulo azimute de superfície ( $\gamma$ ), que determina a distância angular entre o coletor solar e o eixo norte-sul (ou seja, orientação do módulo) e o ângulo de incidência solar ( $\theta$ ), que é a medida angular entre o feixe de radiação incidente em uma superfície e uma linha imaginária normal a superfície.

O maior ganho solar de qualquer incidência ocorre quando  $\theta = 0$ , pois a secção transversal da luz não se propaga para fora, além do que as superfícies refletem mais a luz quando os raios solares não são perpendiculares à superfície.

O melhor ângulo, em graus, de inclinação da superfície ( $\beta$ ) para sistemas conectados à rede é aquele que permite maior captação de energia, podendo ser calculado pela Equação 6:

$$\beta = 3,7 + 0,69 \times \Phi \quad (6)$$

No entanto, não são recomendáveis inclinações menores que  $10^\circ$ , pois facilita o acúmulo de impurezas e dificulta a limpeza dos módulos pela ação da água da chuva (Foster, Ghassemi e Costa 2009).

No que diz respeito a orientação da superfície, os coletores devem estar orientados para o ponto azimutal, de preferência com ângulo azimutal de superfície igual a zero, ou seja, para o hemisfério sul. Os módulos devem ser orientados para norte, recebendo potencialmente Sol o dia inteiro (SOUZA, 2014).

### 4.3 Irradiância solar

Quanto à radiação solar, outros dois conceitos são de extrema importância, sendo eles:

➤ Irradiância solar (G): É a potência (energia dividida pelo tempo) da radiação solar por unidade de área. É medida em Watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

➤ Radiação solar (H): É a quantidade de energia captada do sol em determinada área e sob determinado período de tempo. É medida em Joules por metro quadrado ( $J/m^2$ ), ou mais comumente, Watt-hora por metro quadrado ( $Wh/m^2$ ).

A quantidade de radiação solar absorvida por uma determinada área sob um determinado período de tempo pode ser determinada pela Equação 7:

$$H = G \times S \times t \quad (7)$$

Cujo:

S é a área da superfície coletora, medida em  $m^2$ .

t é o intervalo de tempo, medido em horas.

A intensidade da radiação solar que chega a Terra é praticamente constante e vale, aproximadamente,  $1367 W/m^2$ . No entanto, a quantidade de radiação que chega ao chão, no plano horizontal depende da localização geográfica, das condições

atmosféricas, assim como do período do ano. A atmosfera terrestre age como um filtro, que bloqueia uma parte dessa energia. Quanto mais espessa for a camada atmosférica a ser vencida, menor será a Irradiância solar ao nível do solo. Essa espessura é medida através de um coeficiente chamado Massa de Ar (AM), que pode ser determinado pela Equação 8:

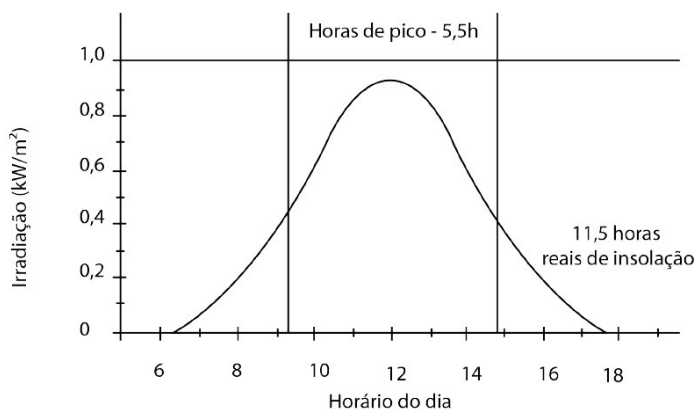
$$AM = \left( \frac{1}{\cos\theta_z} \right) \quad (8)$$

Analisando a equação 8, verifica-se  $AM=1$  quando o sol encontra-se no Zênite, e este valor aumenta à medida que cresce o ângulo entre o feixe solar e a vertical. Para ângulos zenitais maiores que  $60^\circ$ , o ângulo de curvatura da Terra torna-se significativo, devendo ser considerado.

Devido a esses fatores, a máxima Irradiância que chega à superfície terrestre é em torno de  $1000 \text{ W/m}^2$  (SOUZA 2014).

Se colocarmos em um gráfico a variação da Irradiância em um dia médio, podemos observar as horas do dia em que se atinge um valor próximo ou igual a  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Gráfico 6— Gráfico das horas de pico.



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil

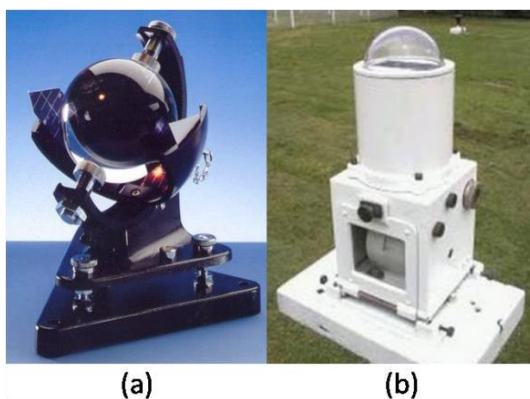
Esse valor é de extrema importância para o cálculo de sistemas fotovoltaicos, pois são nessas horas que um painel fotovoltaico estará gerando o máximo de potência durante o dia. Como consta no Gráfico 6, as horas de sol pico estão compreendidas entre duas a três horas antes e depois do meio-dia-solar.

#### 4.4 Instrumentos de medição

Os instrumentos de medição solarimétricos são responsáveis por medir a incidência da radiação solar em uma determinada área, em condições específicas. A coleta de dados pode ser realizada sobre um plano inclinado ou sobre planos horizontais. O objetivo é obter medidas, da radiação global ou da radiação direta e difusa. Somando estas duas, obtém-se a global. Os instrumentos mais comuns são:

- Heliógrafo: mede a duração da insolação, indicando o número de horas de brilho de sol dentro de um determinado período, Figura 4.a.
- Actinógrafo: também conhecido como piranógrafo, mede a radiação solar global ou sua componente difusa, figura 4.b.

Figura 4 —Instrumentos de medição (a) Heliógrafo (b) Actnógrafo.

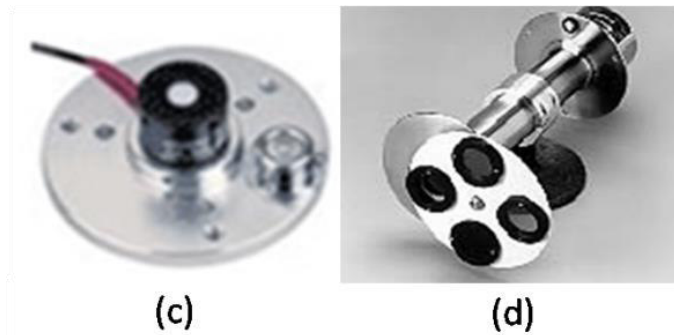


Fonte: MACEDO, C. LUIS E MACÊDO, N. WILSON (2010).

➤ Piroheliômetro: utilizado usualmente para medir a componente direta da radiação. Através de um dispositivo de acompanhamento do sol e de um sistema ótico, aceita apenas a incidência de um feixe de luz, Figura 5 c.

➤ Piranômetro Fotovoltaico: mede a radiação solar total sobre o plano horizontal, sendo também indicado para observar pequenas flutuações de radiação. Seu elemento sensor é uma pequena célula fotovoltaica. São os mais utilizados atualmente, Figura 5 b.

Figura 5 — Instrumentos de medição (c) Piroheliômetro (d) Piranômetro Fotovoltaico.



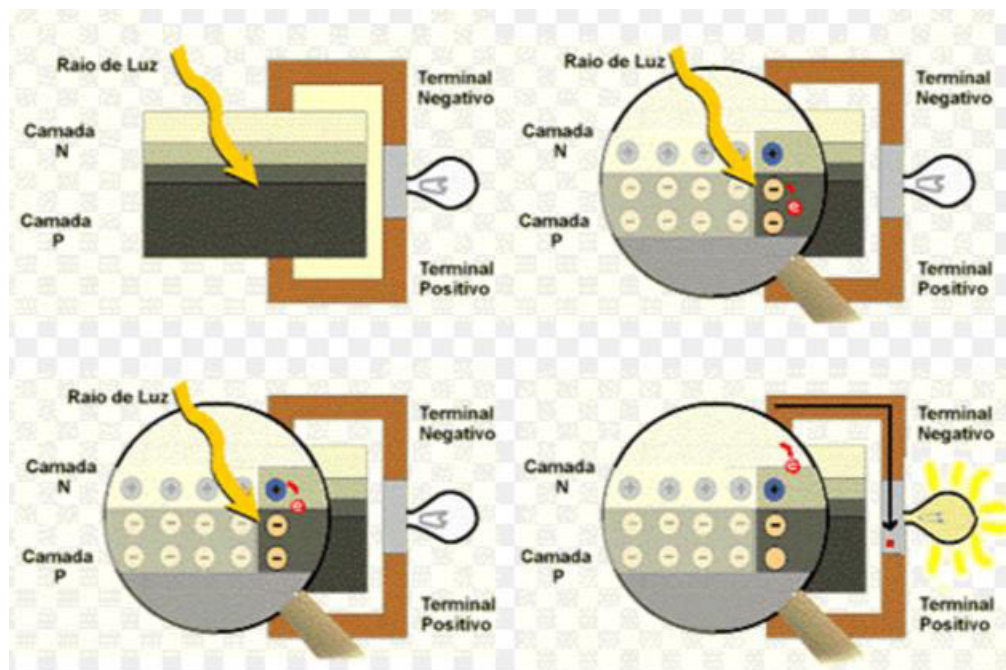
Fonte: MACEDO, C. LUIS E MACÊDO, N. WILSON (2010).

#### 4.5 Células fotovoltaicas

Células fotovoltaicas são dispositivos que convertem diretamente a luz do Sol em eletricidade. Esse processo requer a presença de um material semicondutor que, na presença de radiação, é capaz de elevar o estado energético dos seus elétrons. Existe uma variedade de materiais que satisfazem esses requisitos, mas na prática, os mais empregados são os semicondutores, na forma de junções P-N. O material P apresenta baixa concentração de elétrons, enquanto o N apresenta essas partículas em excesso. A difusão desses elétrons gera corrente contínua entre os eletrodos da célula. O funcionamento dessas células é ilustrado na Figura 6.



Figura 6 — Ilustração do efeito fotovoltaico na junção P-N de uma célula ligada a um circuito elétrico.



Fonte: CRESESB

Os três principais tipos de células fotovoltaicas são: silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos ou silício amorfo. O aumento da demanda, o aprimoramento técnico de produção e a diminuição do preço do silício no cenário mundial, tornaram as células de silício cristalizadas mais comercializadas no mercado, sendo assim, as mais utilizadas para o sistema fotovoltaico (BLUESOL 2012; WIKIENERGIA, 2009).

#### 4.5.1 Células de silício monocristalinas

As células de silício monocristalinas são formadas por apenas uma semente de monocristal de silício. O rendimento elétrico é bastante elevado, chegando a até 23% em testes de Laboratório, porém, a sua grande desvantagem são os custos produtivos elevados devido ao elevado consumo de energia em sua fabricação e a exigência de se utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita.

#### **4.5.2 Células de silício policristalinas**

As células de silício policristalino são constituídas de diversos cristais em contato entre si, dispostos de maneira não alinhada, tendo como objetivo, a redução nos custos de fabricação. Portanto, os custos de produção são inferiores em relação às células de silício monocristalino. No entanto, seu rendimento elétrico também é inferior causada pela imperfeição dos cristais.

#### **4.5.3 Considerações importantes**

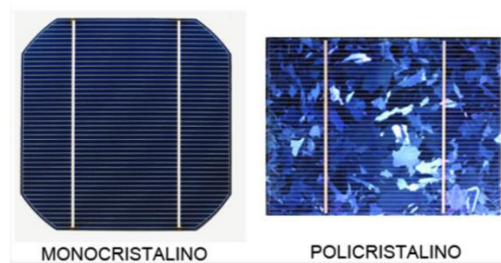
Além da diferença do preço entre as células policristalinas e monocristalinas, Figura 7, é de extrema importância verificar o fator do coeficiente térmico da célula. Essa propriedade mede a perda da capacidade de geração de energia elétrica para cada grau de temperatura acima do padrão de operação da célula. Ou seja, o desempenho da célula diminui à medida que a temperatura solar sobe. (ENERGY MARKET AUTHORITY,2009).

As células monocristalinas apresentam um rendimento mais afetado pelo incremento de temperatura, quando comparado às policristalinas. O princípio básico desta diferença deve-se ao fato de as células monocristalinas serem mais escuras que as policristalinas, o que leva a maior absorção de calor. Desta forma, sua temperatura de operação torna-se maior, afetando o rendimento frente suas homólogas policristalinas.

Portanto, a escolha de célula para um sistema fotovoltaico depende de das considerações especificadas de cada projeto, tais como: disponibilidade de capital para o investimento, localização e design do empreendimento e limitação da área para instalação.

Visando menor preço e menor perda por efeito térmico, pode-se dizer que as células de silício policristalino apresentam melhor custo benefício para o estado do Ceará, já que a região fica localizada próximo à linha do Equador, apresentando clima tipicamente quente durante todo o ano.

Figura 7— Células de silício monocristalino e policristalino.

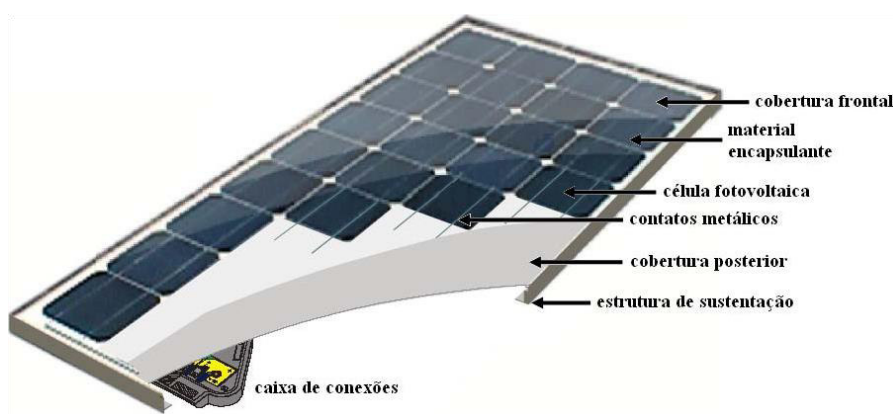


Fonte: pt.solar-energia.net.

#### 4.6 Módulos fotovoltaicos (MF)

O MF, Figura 8, é um conjunto de células conectadas em série, agrupadas, laminadas e embaladas entre folhas de plástico e vidro. Cada conjunto possui uma estrutura de suporte que lhe confere rigidez e facilidade para manuseamento e instalação. O módulo dispõe, ainda, de uma caixa de junção, localizada em seu posterior, onde ficam guardadas as conexões condutoras responsáveis por transferir a energia gerada ou integra-lo a outro equipamento.

Figura 8— Partes constituintes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: MACEDO, C. LUIS E MACÊDO, N. WILSON (2014).

#### 4.6.1 Propriedades elétricas

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos compreendem as seguintes definições (SOUZA 2014).

- Corrente de máxima potência ( $I_{MP}$ ): É o valor da corrente, medido em ampères, quando o dispositivo apresenta a máxima transferência de potência.
- Tensão em máxima potência: ( $V_{MP}$ ): É o valor de tensão, medido em volts, quando o dispositivo apresenta máxima transferência de potência.
- Potência nominal ( $P_N$ ): É a máxima potência que o módulo pode fornecer na condição padronizada de teste. Ou seja, é o valor da potência no ponto de máxima potência mostrado no Gráfico 7. O valor da máxima pode ser determinado pela equação 9:

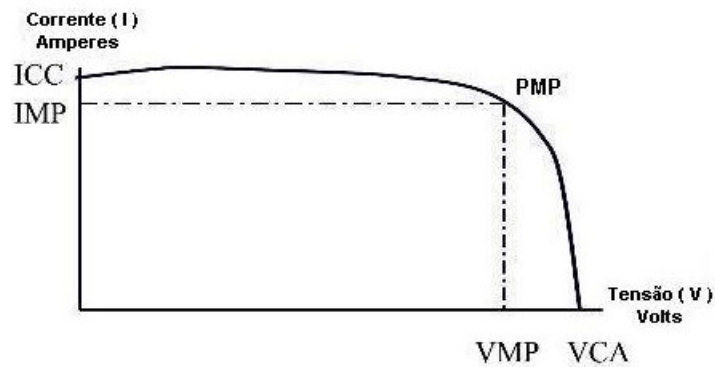
$$P_N = I_{mp} \times V_{pm} \quad (9)$$

- Tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ ): É o valor máximo de tensão, medido em volts, entre os terminais do dispositivo, sem a presença de carga.
- Corrente em curto circuito ( $I_{cc}$ ): É o valor máximo de corrente, medido em ampères, que um dispositivo pode fornecer quando um circuito externo sem resistência é conectado aos seus terminais (condição de curto circuito). Está localizada no ponto onde a curva  $I - V$  toca o eixo y, ou seja onde a tensão é zero.
- Eficiência ( $\eta_m$ ): É o quociente entre a potência gerada e a irradiância incidente sobre o módulo.

#### 4.6.2 Curva de corrente vs. Tensão (curva $I - V$ )

A representação mais utilizada para caracterizar a saída de um dispositivo fotovoltaico (célula, módulo, sistema) é a curva  $I - V$ . Nesta curva, estão presentes a maioria das propriedades elétricas descritas acima. O Gráfico 7, ilustra um exemplo Deste tipo de curva, onde são detectados os pontos  $P_{MP,IMP}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{cc}$ .

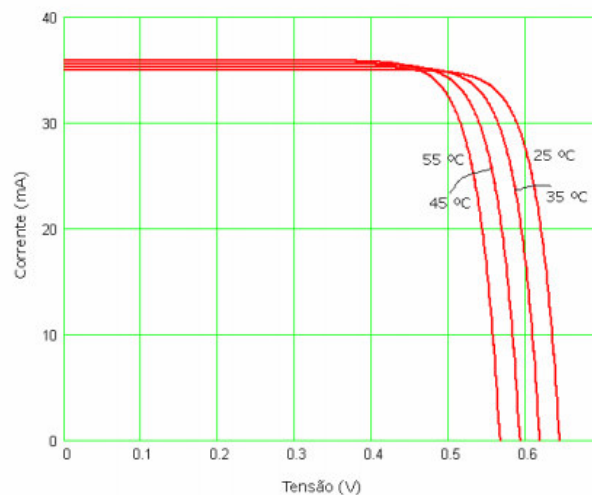
Gráfico 7- Curva Corrente – Tensão.



Fonte: FOSTER, R; GHASSEMI, M; COSTA, (2009).

Sabe-se que a geração de corrente elétrica por um dispositivo esta diretamente relacionada a dois fatores principais: a temperatura de operação e a intensidade luminosa que esta recebe. Os Gráficos 8 e 9 mostram as curvas de variação de tensão e corrente em função da temperatura de operação de um dispositivo fotovoltaico e da irradiância.

Gráfico 8 – Variação da corrente e tensão de um MF em função de sua temperatura de operação.



Fonte: Honsberg e Bowden, 1999

Nota-se que a tensão entre os terminais diminui à medida que a temperatura de operação do dispositivo fotovoltaico aumenta, enquanto que a corrente permanece essencialmente estável. Segundo FOSTER, R; GHASSEMI, M; COSTA, (2009), a tensão de operação de um módulo fotovoltaico é reduzida, em média, para dispositivos cristalizados, em torno de 0,5% para cada grau Célsius acima das condições de teste (STC).

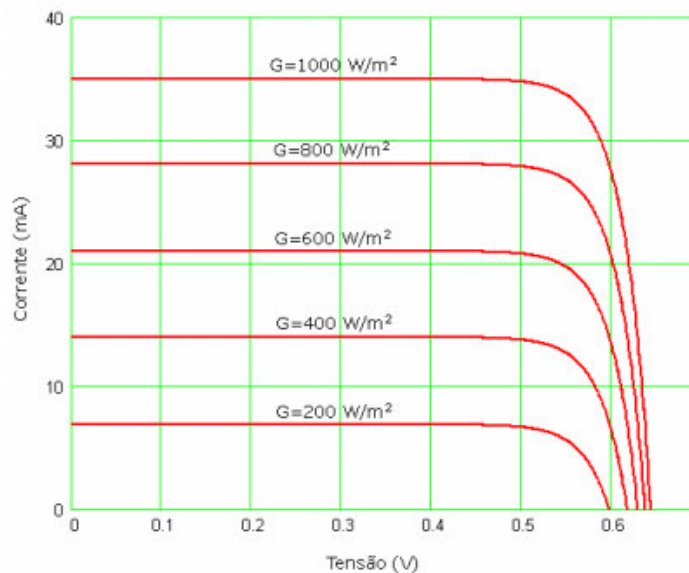
A temperatura das células fotovoltaicas não é a mesma do ambiente, pois as células sofrem um aumento de temperatura ao receber a radiação solar, por conta do efeito fotovoltaico. Essa diferença pode ser estimada através da equação 10:

$$\Delta t = 0,034 \times G - 4 \quad (10)$$

Cujo:

G é a irradiância em W/m<sup>2</sup>.

Gráfico 9 – Variação da corrente e tensão de um MF em função da irradiância solar.



Fonte: Honsberg e Bowden, 1999

Tendo em vista o Gráfico 9, pode-se observar que a tensão permanece praticamente constante com o aumento da irradiação, enquanto que a corrente aumenta significativamente. Isto porque um fóton, com energia suficiente, energiza um elétron. Logo, quanto maior a irradiância, maior a quantidade de fótons, e maior a corrente elétrica gerada (SOUZA 2014).

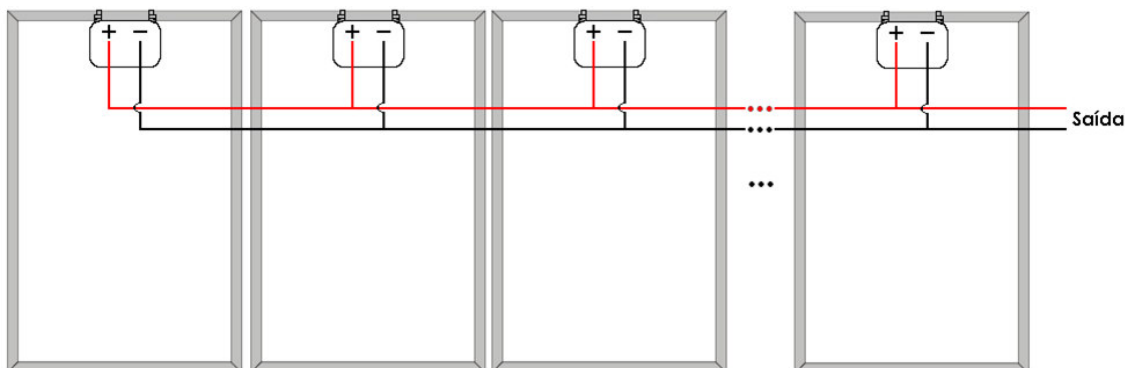
#### 4.7 Associação das Células em módulos Fotovoltaicos.

Os sistemas fotovoltaicos podem empregar um grande número de módulos que, quando articulados a outros componentes, torna-se um sistema fotovoltaico. Para garantir maiores níveis de potência, tensão ou corrente, os módulos podem ser associados em paralelo, em série ou mista, dependendo dos valores desejados.

##### 4.7.1 Associação em paralelo

Quando módulos são conectados em paralelo, Figura 9, a tensão de saída do conjunto é a mesma tensão fornecida por um módulo individual, Equação 11. Entretanto, a corrente fornecida pelo conjunto é a soma das correntes dos módulos do conjunto, Equação 12.

Figura 9 – Esquema de um arranjo em paralelo.



Fonte: Curso Teórico/Prático de Especialização a Nível Técnico Sobre Sistemas Fotovoltaicos.

Valor total de tensão no arranjo paralelo:

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \quad (11)$$

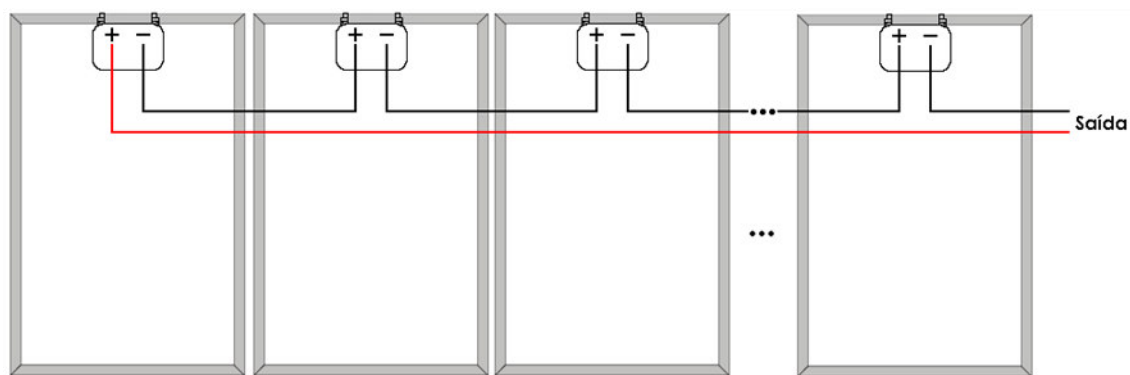
Valor total de corrente no arranjo paralelo:

$$\Delta I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (12)$$

#### 4.7.2 Associação em série

Quando os módulos fotovoltaicos são conectados em série, Figura 10, a tensão de saída do conjunto corresponde à soma de tensão fornecida por cada um dos módulos, Equação 13. Já a corrente que circula pelo conjunto é a mesma em todos os módulos, Equação 14.

Figura 10 – Esquema de um arranjo em série.



Fonte: Curso Teórico/Prático de Especialização a Nível Técnico Sobre Sistemas Fotovoltaicos.

Valor total de tensão no arranjo série:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (13)$$



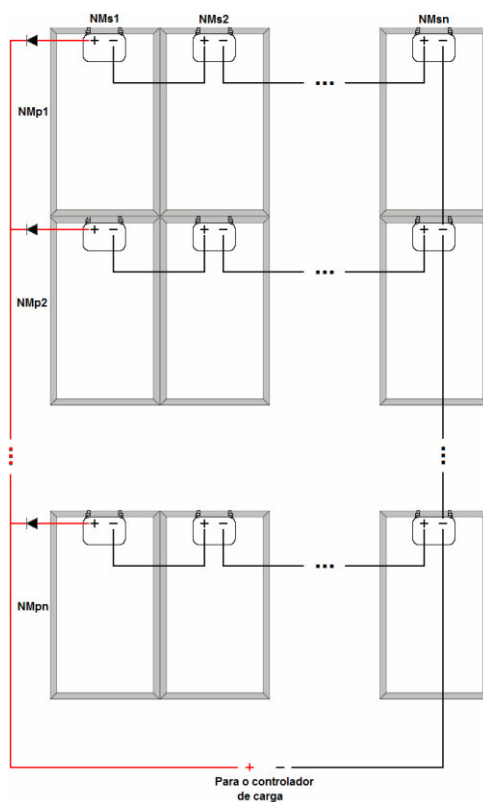
Valor total de corrente no arranjo série:

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (14)$$

### 4.7.3 Associação mista

Comumente, nos SFVs não são encontrados apenas uma forma de associação em série ou em paralelo dos módulos, mas sim, uma combinação das duas. Tal combinação é denominada combinação mista, Figura 11.

Figura 11 —Configuração representativa de uma associação mista.



## 4.8 Sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico (SF) para geração de energia elétrica é um conjunto integrado de equipamentos, painéis fotovoltaicos e outros componentes, projetados para converter a energia solar em eletricidade.

De acordo com sua aplicação final, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados de três maneiras: conectado à rede (*on-grid*), desligado à rede (*off-grid*) e híbrido, o qual apresenta mais de uma fonte de geração de energia.

Como o objetivo deste trabalho é projetar um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR), apenas esse processo será detalhado.

### 4.8.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFCR)

O SFCR alimenta a rede elétrica à qual estão conectados com energia elétrica gerada localmente e não são equipados com dispositivos de armazenamento. A ausência de acumuladores reduz a complexidade do dimensionamento do sistema, mas a ligação à rede traz complicações, pois deve ser feito um trabalho de ajuste de tensão, frequência e redução da distorção de harmônicos, para que a eletricidade injetada na rede seja compatível com a fornecida pela concessionária de energia.

O objetivo do emprego desse tipo de sistema é gerar eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou eliminar a necessidade de consumir da rede pública ou até mesmo gerar excedentes que podem ser aproveitados como créditos em meses em que a geração for mais baixa.

Segundo as definições utilizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os SFCR podem ser classificados em três categorias, conforme seu porte. São elas:

- Microgeração: potência instalada até 100 KW;
- Minigeração: potência instalada entre 100 KW e 1 MW;
- Usinas de eletricidade: potência acima de 1 MW.

## 4.8.2 Componentes de um SFCR

Em geral, um SFCR possui os seguintes componentes:

- Módulos fotovoltaicos associados em série e/ou paralelo;
- Caixa de junção dos módulos fotovoltaicos;
- Caixa de interruptor principal;
- Caixa de isolamento CA e CC;
- Estruturas de suporte;
- Inversor interativo;
- Medidor bidirecional de energia;
- Sistema de proteção;
- Cabos CC e CA.

### 4.8.2.1 Caixa de junção dos MF

É responsável por conectar todas as *strings* de um sistema de um sistema fotovoltaico e abrigar alguns dispositivos de proteção, tais como: diodos de *by-pass*, diodos de bloqueio, fusíveis, dispositivos de produção contra surto (DPS) e interruptor geral CC.

### 4.8.2.2 Caixa de interruptor principal

É mais um componente de isolamento e segurança dos sistemas para caso de falhas elétricas. Ele está localizado após o inversor e antes do medidor bidirecional de energia.

### 4.8.2.3 Caixa de isolamento CA e CC

Este componente nada mais é do que um isolamento que protege a entrada e a saída do inversor, possibilitando sua desconexão segura, caso necessário.

#### **4.8.2.4 Estruturas de suporte**

Tão importantes quanto os módulos fotovoltaicos, são as estruturas que os contêm. O mau funcionamento dos suportes reduz os investimentos na tecnologia limpa da energia solar. Para cada caso, há uma solução. No caso de telhados, deve ser verificado o tipo de telha ou de madeiramento, assim como a estrutura que suporta o telhado. Nas instalações em plano horizontal deve ser verificada a altura mínima e também as cargas de vento que adicionam um esforço mecânico aos suportes e ancoragens.

Em todos os casos deve ser observada a correta orientação e inclinação do painel. A correta orientação permite captar o máximo de energia ao meio dia solar e horas próximas, que é o momento de maior concentração da radiação solar. A inclinação adequada permite a melhor captação durante o ano, compensando a menor irradiância nos períodos de inverno, no caso dos sistemas autônomos, ou maximizando a captação e geração nos períodos de verão, no caso das instalações on-grid.

#### **4.8.2.5 Inversor interativo**

Este equipamento é responsável por converter a corrente contínua gerada pelos MF em corrente alternada, para que a mesma possa ser distribuída à rede pública de distribuição.

Os inversores interativos são bastante sofisticados e apresentam funcionamento complexo, operando em sincronismo com a rede, ou seja, fornecendo valores de corrente, frequência e tensão alternada o mais próximo possível dos da rede. Além de fornecer energia para rede, o inversor também atende as necessidades da unidade consumidora, injetando apenas o excedente na linha de distribuição.

As especificações técnicas mais importantes dos inversores são seus limites operacionais, seus requisitos para instalação, seus requisitos de segurança e seus requisitos de manutenção.

A definição da quantidade de inversores a serem utilizados em um SFCR é um processo de análise de informações técnicas e comerciais. No que diz respeito ao

lado técnico, a seleção do inversor depende do tipo de sistema e das condições de instalação dos módulos.

Como os inversores interativos compõem boa parte do investimento de um SFCR, muitas vezes, sua escolha se dá por fatores comerciais, tais como: menor custo, menores impostos ou presença de software para acompanhamento de geração.

Sempre que possível, os inversores devem ser instalados juntos a caixa de junção dos módulos ou em sua proximidade, para que as perdas de energia que ocorrem através do cabo principal CC possam ser reduzidas, assim como os custos de instalação. Existe, ainda, o fator das condições ambientais que devem atender aos requisitos exigidos pelo fabricante, especialmente em termos de umidade e temperatura.

#### **4.8.2.6 Medidor bidirecional de energia**

Equipamento responsável por medir toda a energia que entra na unidade consumidora, através da distribuidora e que sai da mesma, através do SFCR. Em geral, os medidores convencionais utilizados pelas concessionárias de energia não possuem essa capacidade de dupla medição, o que acarreta na necessidade da troca dos mesmos para a adequação aos SFCR.

#### **4.8.2.7 Cabos CC e CA**

Os cabos são responsáveis pela interconexão de todos do demais componentes, para cada parte do sistema, existe um cabo específico.

#### **4.8.2.8 Sistemas de proteção**

Vários sistemas de proteção podem ser aplicados aos SFCR, sendo alguns obrigatórios e outros opcionais. Os componentes de proteção mais comuns são os disjuntores, aparelhos que isolam o sistema automaticamente caso ocorra alguma sobrecarga ou curto-circuito.

Módulos fotovoltaicos inteiros podem ser danificados permanentemente devido à presença de sombra em alguma célula, o que provoca um superaquecimento do local.

Uma forma de contornar esse problema é através da utilização dos diodos de by-pass que desviam a corrente da célula ou módulo sombreado. Esse dispositivo é, normalmente, montado na caixa de conexão quando utilizado para contornar um módulo inteiro. Existem também os diodos de bloqueio e os DPS. O primeiro é utilizado nas fileiras de módulos em série, para evitar que um módulo sombreado transforme a fileira inteira em uma carga. Já o DPS é um sistema que protege o painel fotovoltaico em caso de surtos de tensão, devido a descarga atmosférica (WINKENERGIA 2009).

#### **4.9 Referências normativas**

Como o projeto apresentado teve como objetivo final, participar do sistema de compensação de energia elétrica brasileiro, o mesmo foi elaborado de forma a respeitar essas normas.

As normas aplicadas para esse tipo de geração distribuída abrange a Resolução Normativa Nº 414/2010, a Resolução Normativa Nº 482 e Resolução Normativa Nº 687, que altera partes da Resolução Normativa Nº 482. Também foram observadas as normas da COELCE, presentes na Norma Técnica NT-Br 010/2015 e a Resolução nº 690, dispendo sobre o incentivo à geração própria de Unidades Consumidoras (UC).

Dentre outros parâmetros, essas normas estabelecem “as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica”.

## **5 FÁBRICA DE POLPAS DE FRUTA**

A fábrica de polpas, onde deseja-se instalar o SFCR, conta com uma sede própria instalada em uma área de 12 mil metros quadrados no município de Caucaia, na Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. Atualmente, 30 funcionários se revezam em dois turnos, 7:00 às 12:00 e 12:30 às 18:30 para manter a produção da fábrica.

Os trabalhos na fábrica começaram com o processamento da polpa da Acerola. Hoje, a fábrica processa 18 tipos diferentes de frutas e tem uma capacidade de produção de até 15 toneladas por dia. Para isto, conta com equipamentos de última geração, câmaras refrigeradas e túneis de congelamento. Equipamentos os quais geram um consumo elevado de energia elétrica, pois vários destes equipamentos permanecem ligados durante 24 h por dia.

A maior parte da produção é destinada ao mercado local (Fortaleza e Região Metropolitana), por meio de uma frota de veículos da empresa, e o restante é distribuído para as demais localidades nos estados vizinhos (PI, MA, RN).

## **6 DIMENSIONAMENTO DO SFCR**

No desenvolvimento de projetos de SFVs, a etapa mais importante, é o dimensionamento. O principal critério a ser considerado durante um dimensionamento é a quantidade de energia que deverá ser gerada pelo sistema para suprir a necessidade de consumo solicitada pelo usuário. Porém, há, inicialmente, que se considerar os dados solarimétricos do local onde se deseja instalar o sistema. Dados estes obtidos por medições, tabelas existentes, programas computacionais ou mapas solarimétricos, tendo o cuidado de especificar o local corretamente, ou a área mais próxima do lugar onde o sistema será implantado. Possíveis erros na aquisição de dados podem resultar em prejuízos financeiros ou geração energética insuficiente.

A metodologia aqui apresentada é baseada nos estudos de Foster; Ghassemi e Costa (2009), Souza (2014) e Green pro (2004), bem como nas normas mencionadas e outras pesquisas citadas subsequentemente.

## 6.1 Visita e levantamento das características do local da instalação

Para começar o planejamento de um sistema fotovoltaico, tendo em vista o seu posterior dimensionamento e respectivo orçamento para apresentar ao cliente, é fundamental conhecer bem o local da instalação. A visita ao local da instalação permitirá efetuar uma avaliação prévia sobre as condições básicas existentes, que poderão levar uma indicação mais ou menos favorável sobre instalação de um sistema fotovoltaico.

Durante a visita técnica ao local, o projetista pode identificar uma série de informações que contribuem para uma boa avaliação do perfil do SFCR, como:

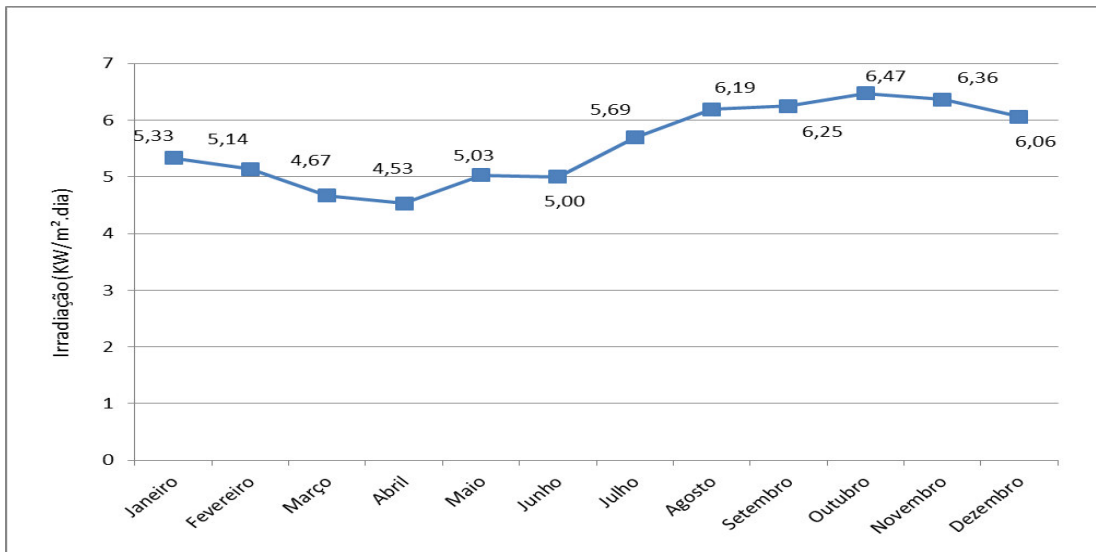
- Disponibilidade da área do telhado, fachadas e/ou superfícies disponíveis na envolvente;
- Orientação e inclinação das estruturas disponíveis à colocação do sistema
- Formato do telhado, características da estrutura e sub-estrutura, e tipo de cobertura;
- Dados sobre sombreamentos;
- Comprimento dos cabos e método de implantação da canalização eléctrica;
- Tipo de módulo, concepção do sistema, método de instalação;
- Produção energética desejada *versus* potência fotovoltaica a instalar;
- Enquadramento financeiro, tendo em conta as respectivas condições para a atribuição de subsídios;

## 6.2 Descrição do local e disponibilidade do recurso solar

No Gráfico 10 constam os índices de radiação solar em uma região próxima à fábrica de polpas, localizada na cidade de Caucaia, Ceará. Pelo gráfico, também, se pode identificar os meses com maior e menor índices de radiação no local. Em outubro a irradiação alcança os maiores picos, com valores próximos de 6,5 KWh/m<sup>2</sup>.dia, enquanto que em abril, período de chuvas na região, estes índice cai consideravelmente para 4,7 KWh/m<sup>2</sup>.dia.



Gráfico 10– Irradiação solar para localidades próximas à Fábrica de Polpas



Fonte: Elaborado pelo autor através de dados da CRESESB.

De acordo com os dados do Gráfico 10, pode-se determinar o valor médio de Horas solar por dia (HSP) para a localidade. Logo, HSP = 5,56 KWh/m<sup>2</sup>.dia. Este valor é uma das informações mais importantes para projetos de energia solar, pois como será visto mais adiante, a irradiação solar é diretamente proporcional à potência do sistema fotovoltaico.

### 6.3 Área disponível para instalação e orientação dos módulos

Utilizando o aplicativo Google Maps, foi possível identificar a localização exata da fábrica, -3.692348 S e -38.708552 O. Além da identificação das coordenadas, foi feita uma estimativa da área total disponível nas estruturas de cobertura da fábrica. A área total aproximada disponível de telhado para instalação dos módulos fotovoltaicos é de 4.250 m<sup>2</sup>.

Figura 12 — Área disponível para instalação dos MFs.



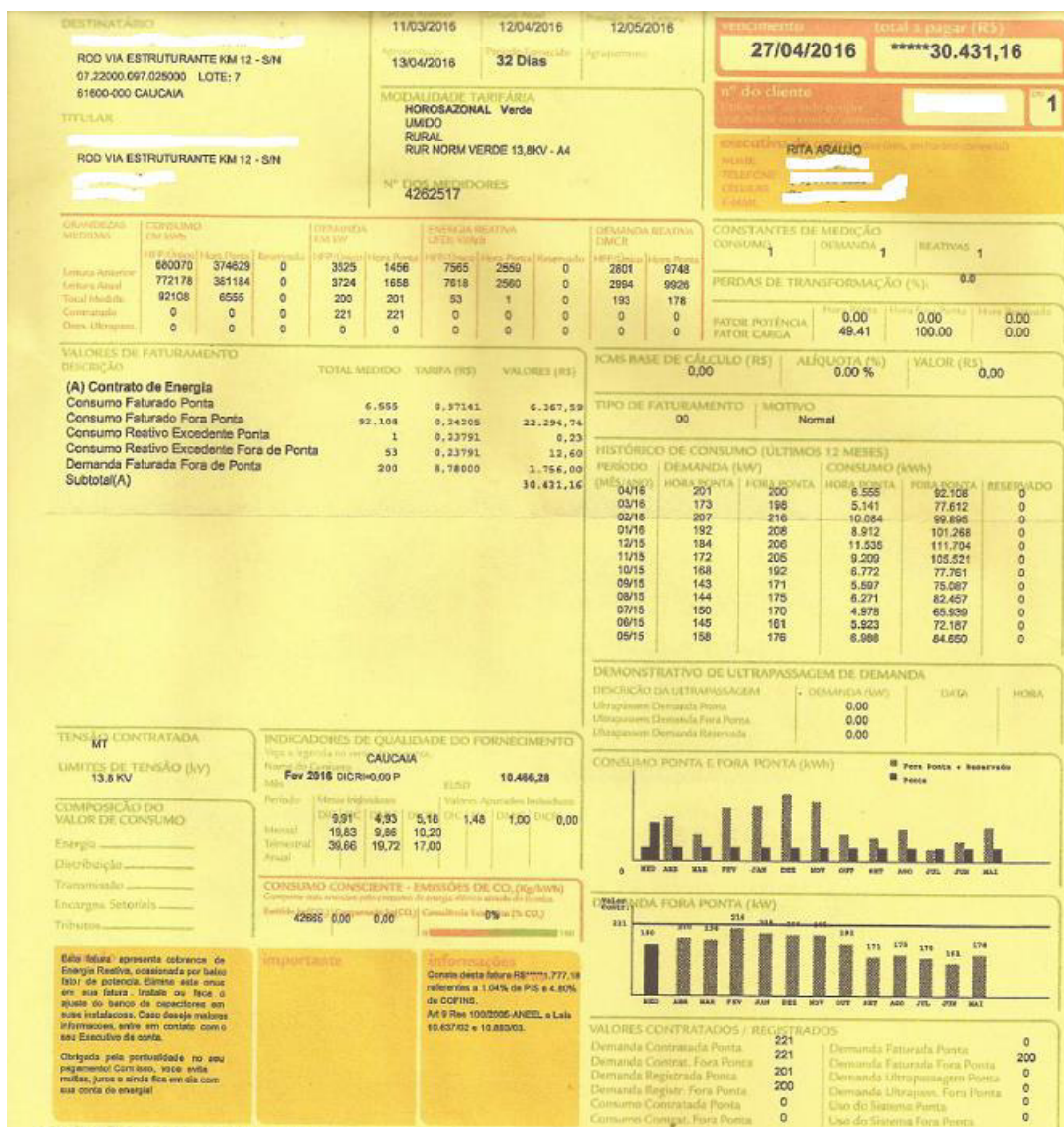
Fonte: Elaborada pelo autor através de dados do Google Maps.

Conforme discutido anteriormente, o ângulo azimutal do módulo fotovoltaico e o sombreamento incidente sobre eles são fatores determinantes para bom desempenho do sistema. Os telhados da fábrica são todos voltados para a direção norte-sul (azimute aproximadamente igual a  $0^\circ$ ). Para aperfeiçoar o aproveitamento da irradiação, é dada preferência aos telhados voltados para o Norte. A fim de encontrar o melhor desempenho para o sistema, apenas os telhados voltados para o Norte serão considerados para o projeto, o que consiste em metade da área estimada,  $2.125 \text{ m}^2$ . Em relação ao sombreamento, pode-se verificar na Figura 12 que a presença de árvores no entorno dos prédios não interferem a irradiação sobre os telhados da fábrica.

#### 6.4 Análise do faturamento de energia da Fábrica de polpas

A análise do faturamento de energia do cliente, Figura 13, é uma das etapas iniciais mais importantes do projeto de um SFCR. Diante da conta de luz gerada pela COELCE, podem ser extraídas várias informações importantes para dimensionamento do projeto, como: consumo da energia do cliente em  $\text{KWh/m}^2.\text{dia}$ , o histórico anual de consumo de energia e o montante cobrado pela empresa de acordo com suas tarifas.

Figura 13 – Faturamento de energia da fábrica de polpas – Abril 2016



Fonte: COELCE.

Diante das informações na conta de luz do cliente, apresenta-se a Tabela 1 com as informações mais relevantes que podem ser extraídas da fatura de energia do consumidor.

Tabela 1 – Principais informações da conta de energia.

INFORMAÇÕES GERAIS					
Local	Caucaia-CE	Mês de referência	Abril	Ano	2016
Classe do cliente		A	Sub Classe do cliente		4
Modalidade tarifária	Horosazonal Verde/UMIDO/RURAL				
Tensão de fornecimento				13,8	KV
VALORES CONTRATADOS					
Demanda Contratada Ponta			221	KW	
Demanda Contratada F.Ponta			221	KW	
TE Demanda Contratada			8,78	R\$/KW	
TE Consumo de Ponta			0,97141	R\$/KW	
TE Consumo F. Ponta			0,24205	R\$/KW	
CONSUMO MÉDIO					
Data	Demanda [ KW]		Consumo [ KWh]		A energia consumida, neste caso, é calculada pela soma das médias de Consumo em Ponta e F.Ponta
	Ponta	F.Ponta	Ponta	F. Ponta	
mai/15	158	176	6.996	84.650	
jun/15	145	161	5.523	72.187	
jul/15	150	170	4.978	65.939	
ago/15	144	175	6.271	82.457	
set/15	143	171	5.597	75.087	
out/15	168	192	6.772	77.761	
nov/15	172	205	9.209	105.521	
dez/15	184	206	11.535	111.704	
jan/16	192	208	8.912	101.268	
fev/16	207	216	10.184	99.895	
mar/16	173	198	5.141	77.612	
abr/16	201	200	6.555	92.108	
<b>MÉDIA</b>	<b>170</b>	<b>190</b>	<b>7.306</b>	<b>87.413</b>	<b>Econsumida [ KWh]</b>
					<b>94.719</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante destacar a classificação “rural” e “verde” do consumidor. Estes termos, segundo a COELCE, significam que a demanda a ser faturada se dá pelo maior valor entre a demanda máxima medida no ciclo de faturamento e 10 % da demanda contratada. Conforme informações disponibilizadas no Portal COELCE.

Logo, tem-se que a energia consumida da fábrica é 94.719 KWh/mês.

## 7 CÁLCULO DE POTÊNCIA DO SFCR

A potência do SFCR ( $POT_{SFCR}$ ) pode ser calculada pela Equação 15:

$$POT.SFCR = \frac{ECOMP}{HSP} \quad (15)$$

Cujo:

$E_{comp}$  é a energia de compensação em base diária.

De acordo com o consumo de energia, A fábrica de polpas está classificada no grupo A, alta tensão (AT). Para este tipo de grupo, a energia de compensação preliminar é dada pela equação 16:

$$ECOMP = ECONS \quad (16)$$

Logo, pode-se calcular a potência do SFCR:

$$POT.SFCR = \frac{94.719/30 \text{ [KWh/dia]}}{5,56 \text{ [KWh/dia]}} = 567,85 \text{ KW}$$

Como é possível perceber, a potência preliminar do sistema é superior ao valor da demanda contratada pela unidade consumidora. Desta forma, é necessária fazer uma análise do custo benefício que se teria para solicitar o aumento da potência disponibilizada.

Para o caso de clientes em AT, a potência disponibilizada é equivalente à demanda contratada, logo, o aumento deste valor implica um aumento no montante contratado pelo cliente, e conseqüentemente, proporciona um valor maior de custo mínimo para o cliente a ser pago.

Caso o incremento resulte em potência cujo valor exceda a capacidade do transformador da unidade, a troca e adequamento do equipamento deverá ser realizada pelo cliente, ocasionando em mais custos para o mesmo.

Para o caso específico do projeto da fábrica de polpas, observou-se que a potência preliminar do SFCR ultrapassou em 346.85 KW a demanda contratada. Além disso, para um SFCR produzir 567,85 KW, a área necessária para implantação dos MF

é muito grande como veremos mais adiante. Assim, para este projeto será dimensionado um SFCR para atender apenas metade do consumo da fábrica, 284,93 kW.

## 8 DEFINIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A fabricação de módulos fotovoltaicos no Brasil está começando a se desenvolver cada vez mais, graças a países investidores como China e Alemanha. Com o intuito de utilizar produtos nacionais, os módulos fotovoltaicos escolhidos para este projeto são da marca Globo Brasil, GBR315p, cujas principais informações estão disponíveis na Tabela 2. As especificações completas estão disponíveis no apêndice A.

A Globo Brasil é a primeira grande indústria de painéis solares do país, inaugurada em 28 de agosto de 2015, na cidade de Valinhos, SP. A produção de MF desta empresa combina tecnologia alemã, suíça e chinesa, com uma produção totalmente automatizada e com um rigoroso controle de qualidade.

Tabela 2: Principais informações do módulo fotovoltaico escolhido.

<b>MÓDULO FOTOVOLTAICO GBR315p</b>			
<b>PERFORMANCE ELÉTRICA</b>			
<b>POTÊNCIA NOMINAL MÁXIMA</b>	<b>Pn.mod</b>	<b>315</b>	<b>W</b>
<b>TENSÃO EM CIRCUITO ABERTO</b>	<b>Voc</b>	<b>45,38</b>	<b>V</b>
<b>CORRENTE DE MÁXIMA POTÊNCIA</b>	<b>Imp</b>	<b>8,61</b>	<b>A</b>
<b>CORRENTE DE CURTO -CIRCUITO</b>	<b>Isc</b>	<b>9,5</b>	<b>A</b>
<b>CORRENTE DE PICO</b>	<b>IMP</b>	<b>8,61</b>	<b>A</b>
<b>TENSÃO DE POTÊNCIA MÁXIMA</b>	<b>VmP</b>	<b>36,6</b>	<b>V</b>
<b>EFICIÊNCIA</b>	<b><math>\eta</math></b>	<b>16,2</b>	<b>%</b>
<b>PARÂMETROS MECÂNICOS</b>			
<b>TIPO DE CÉLULA</b>	<b>POLICRISTALINA</b>		
<b>QUANTIDADE DE CÉLULAS</b>	<b>72</b>		
<b>DIMENSÕES DO PAINEL</b>	<b>1956x992x40</b>	<b>mm</b>	
<b>MOLDURA</b>	<b>ALUMÍNIO</b>		
<b>PESO</b>	<b>27</b>	<b>Kg</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor. Dados publicados pelo Globo Brasil.

## 8.1 Cálculo do número de módulos fotovoltaicos

Sabendo a potência do SFCR e as especificações do MF, pode-se dimensionar a quantidade de módulos fotovoltaicos, sua associação e os inversores a serem utilizados. O número de módulos pode ser determinado pela Equação 17 :

$$N^{\circ}mod = \frac{POT.SFCR}{Pn.mod} = \frac{284.930 [W]}{315 [W]} = 904 und \quad (17)$$

Cujo:

$Pn.mod$  é a potência nominal máxima do MF.

## 8.2 Cálculo da área total ocupada pelos MFs

Como o número de módulos fotovoltaicos já foi calculado, a área total ocupada pelos mesmos pode ser simplesmente determinada multiplicando o número de MF pela área de um componente, Equação 18:

$$A_{total} = A_{mod} \times N^{\circ}mod. c \quad (18)$$

$$A_{total} = (1,956 \times 0,992)[m^2] \times 904 = 1.754 m^2$$

Logo, para que o SFCR atenda metade da demanda consumida de energia da fábrica é necessária uma área de no mínimo 1.754 m<sup>2</sup> para instalação dos MFs.

## 9 ANÁLISE DO INVERSOR

Os inversores são indispensáveis para interligação do arranjo fotovoltaico com a rede elétrica convencional. Para que o inversor funcione satisfatoriamente, é necessária a análise de seus parâmetros de saída: frequência, corrente e tensão, pois os mesmos devem ser compatíveis com a rede a qual se pretende conecta-lo, assim como, a análise de seus parâmetros de entrada.

O fator de dimensionamento de inversores (FDI), que representa a relação entre a capacidade do inversor e a potência nominal do gerador fotovoltaico, deve ser avaliado de acordo com o local de operação do sistema. Nas regiões próximas à Linha do Equador, os picos de radiação são mais frequentes, fazendo com que o gerador fotovoltaico opere mais próximo de sua potência nominal, exigindo assim, uma maior potência de operação por parte dos inversores. Em virtude desse fato, não é interessante subdimensionar os inversores em SFCR em locais de alto nível de irradiação. O subdimensionamento pode levar a decréscimos consideráveis de potência nestas regiões.

Para este projeto, foi selecionado o inversor solar central SIW700 T330-33, fabricado pela indústria brasileira WEG, o qual é vendido em todo o país. Os dados da Tabela 3 foram tirados da ficha de especificações técnicas do equipamento, disponibilizada pelo fabricante. As especificações completas estão disponíveis no apêndice B.

Com intuito de maximizar a extração de energia, o equipamento escolhido possui um algoritmo, *Maximum power point tracking* (MPPT), para intervalos de tensão entre 540 V e 850 V. A eficiência de transferência de potência a partir da célula solar depende tanto da quantidade de luz solar como do índice de radiação sobre os painéis solares. Como a quantidade de luz solar varia, o objetivo do sistema de MPPT é aplicar a resistência adequada para obter a potência máxima de acordo com as condições ambientais.



Tabela 3—Principais informações do inversor selecionado.

<b>INVERSOR SOLAR CENTRAL SIW700 T330-33</b>			
<b>ENTRADA (CC)</b>			
<b>Máxima Corrente Recomendada</b>	<b>I<sub>cc.max</sub></b>	<b>715</b>	<b>A</b>
<b>Tensão Máxima</b>	<b>V<sub>cc.max</sub></b>	<b>1000</b>	<b>V</b>
<b>Tensão mínima</b>	<b>V<sub>cc.mín</sub></b>	<b>540</b>	<b>V</b>
<b>Eficiência</b>	<b>η</b>	<b>99,8</b>	<b>%</b>
<b>SAÍDA (CA)</b>			
<b>Potência Nominal</b>	<b>P<sub>ca. Max</sub></b>	<b>300</b>	<b>KW</b>
<b>Corrente Nominal</b>	<b>I<sub>ca</sub></b>	<b>525</b>	<b>A</b>
<b>Máxima Corrente</b>	<b>I<sub>ca.max</sub></b>	<b>583</b>	<b>A</b>
<b>Tensão de Saída</b>		<b>330</b>	<b>V</b>
<b>Frequência Nominal</b>	<b>f</b>	<b>60</b>	<b>Hz</b>
<b>Máxima eficiência</b>	<b>η</b>	<b>98,27</b>	<b>%</b>
<b>INFORMAÇÕES GERAIS</b>			
<b>Comunicação</b>	<b>RS485,ModBus e USB</b>		
<b>Monitoramento remoto</b>	<b>SCADA WEG</b>		
<b>Temperatura Ambiente</b>		<b>-10 á +50</b>	<b>° C</b>
<b>Grau de Proteção</b>	<b>IP20</b>		
<b>Máximo Consumo</b>		<b>800</b>	<b>W</b>
<b>Consumo em stand-by</b>		<b>200</b>	<b>W</b>
<b>Consumo noturno</b>		<b>100</b>	<b>W</b>

Fonte: Elaborado pelo autor. Dados publicados pelo Grupo WEG.

### 9.1 Análise do número máximo de MF conectados ao inversor

O número máximo de MF conectados ao inversor pode ser determinado de acordo com o valor da potência em CC admissível pelo equipamento, valor o qual não pode ser ultrapassado. Logo, pode-se determinar este número pela Equação 19:

$$N^{\circ} \text{ max. mod.} = \frac{P_{ca. max. inv}}{P_{n. mod}} = \frac{300 [KW]}{315 [W]} = 952 \text{ und} \quad (19)$$

A tensão e corrente de entrada no inversor devem admitir intervalos de funcionamento de acordo com as margens estabelecidas pelo fabricante. Estes intervalos podem ser determinados de acordo com as associações dos MF em série e/ou paralelo.

## 9.2 Análise da corrente de entrada do inversor

A corrente de entrada do inversor deve admitir a corrente equivalente dos MF conectados em paralelo, logo é importante analisar o número de strings conectadas em paralelo.

### 9.2.1 Número máximo strings em paralelo

O número máximo de strings em paralelo ( $N^{\circ} \text{max. string}$ ) pode ser determinado de acordo com o valor da corrente máxima de entrada do inversor, obedecendo a Equação 20:

$$N^{\circ} \text{max. string} = \frac{I_{cc. max}}{I_{sc. mod}} = \frac{715 [A]}{9,5 [A]} = 76 \text{ und} \quad (20)$$

Cujo:

$I_{cc. max}$  é a corrente máxima admissível para uma entrada do inversor e  $I_{sc. mod}$  é a corrente em curto-circuito do MF.

## 9.3 Análise da tensão de entrada do inversor

A tensão de entrada do inversor deve admitir a tensão equivalente dos MF conectados em série, pois como foi visto anteriormente, os módulos ligados em série resultam no somatório de suas tensões.

### 9.3.1 Número máximo de MF em série por string

O inversor deverá receber um valor de tensão sempre abaixo do valor de máxima tensão de entrada permitida, logo, o número máximo de módulos em série por string ( $N^{\circ} \text{max. mod. s}$ ) pode ser calculado pela Equação 21:

$$N^{\circ} \text{ max. mod. s} = \frac{V_{cc. \text{ max}}}{V_{oc. \text{ mod}}} = \frac{1000 [V]}{45,38 [V]} = 22 \text{ und} \quad (21)$$

Cujo:

$V_{cc. \text{ max}}$  é o valor da tensão máxima admissível pelo inversor e  $V_{oc. \text{ mod}}$  é o valor de tensão em circuito aberto do MF.

### 9.3.2 Número mínimo de MF em série por string

Para o funcionamento adequado do inversor, os MF precisam fornecer um valor mínimo de tensão, que pode ser determinado pela Equação 22:

$$N^{\circ} \text{ mín. mod. s} = \frac{V_{cc. \text{ mín}}}{V_{mp. \text{ mod}}} = \frac{540 [V]}{36,6 [V]} = 15 \text{ und} \quad (22)$$

Cujo:

$V_{cc. \text{ mín}}$  é a mínima tensão de funcionamento do inversor e  $V_{mp. \text{ mod}}$  é a tensão em máxima potência do MF.

## 10 DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR

De acordo com estes intervalos calculados é possível determinar a forma de associação dos módulos fotovoltaicos e inversores. A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados preliminares.

Tabela 4: Cálculos preliminares.

SFCR		
POT.SFCR	284,93	KW
MF		
Pn.mod	315	W
Nº.mod	904	und
INVERSOR		
Nº max.mod	952	und
Nº max.mod.p	76	und
Nº max.mod.s	22	und
Nº mín.mod.s	15	und

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferentes tipos de combinação podem atender os intervalos, no entanto, é de extrema importância buscar aquela que proporciona a máxima eficiência do inversor. Para isto, é necessária a análise das curvas de eficiência do equipamento selecionado.

Para facilitar o design eficiente de um SFCR, a potência em CA de saída do inversor não deve ser menor do que 75% da potência nominal do arranjo fotovoltaico, o qual não deve ser superior ao limite máximo permitido pelo fabricante do inversor para a potência em CC de entrada (Clean Energy Council 2013).

Assim, as configurações propostas para o inversor estão disponíveis na Tabela 5:

Tabela 5: Configuração preliminar do inversor.

<b>CONFIGURAÇÃO PRELIMINAR DOS INVERSORES E MF</b>		
<b>Configuração</b>	<b>Inversor 1</b>	<b>Unidade</b>
<b>Nº de MF em série</b>	<b>22</b>	<b>und</b>
<b>Nº de MF em paralelo</b>	<b>41</b>	<b>und</b>
<b>Total de MF</b>	<b>902</b>	<b>und</b>
<b>Potência Total (MF)</b>	<b>284,13</b>	<b>KW</b>
<b>FDI</b>	<b>1,05</b>	<b>—</b>
<b>Pca-max (Inversor)</b>	<b>300</b>	<b>KW</b>
<b>Pcc-max (Inversor)</b>	<b>300</b>	<b>KW</b>
<b>0,75% x Pot. Total (MF)</b>	<b>213,09</b>	<b>KW</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

## **11 ANÁLISE DE PERDAS E AJUSTES APLICÁVEIS AOS SFCR**

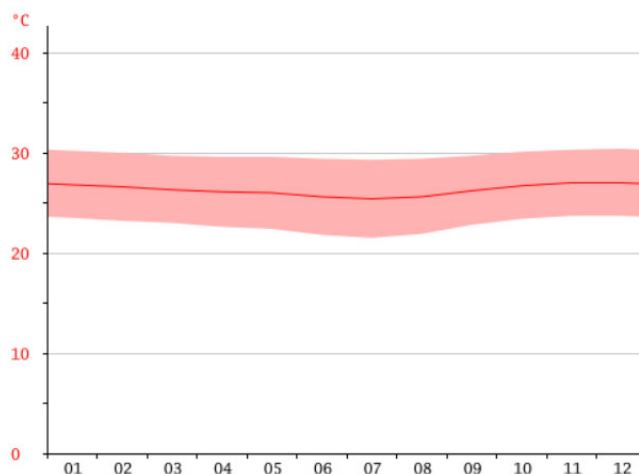
Uma das melhores maneiras de se avaliar as perdas de energia de um SFCR é analisando os fatores de perdas que acontecem a cada estágio do sistema. Portanto, para este trabalho serão consideradas as perdas antes, durante e depois da geração do MF.

## 11.1 Perdas por fator de temperatura

Conforme já discutido neste trabalho, a temperatura ambiente exerce forte influência sobre a eficiência das células fotovoltaicas, interferindo sobre os valores de potência, tensão e corrente gerados pelo efeito fotovoltaico.

Será utilizado como referência o valor médio para as temperaturas máximas em Caucaia- CE ao longo dos últimos anos, 29,9 °C, de acordo com Gráfico 11, disponível no banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Será utilizada a média das temperaturas máximas mensais, pois a temperatura ambiente tenderá a ser sempre menor ou igual aos valores previstos, garantido assim, que as eficiências especificadas sejam sempre atendidas.

Gráfico 11— Temperaturas médias do município de Caucaia.



Fonte: Climate-Data.org.

### 11.1.1 Compensação por fator de temperatura da Potência de pico

A perda por temperatura na potência de pico dos MF ( $L_{pot}$ ) é calculada pela Equação 23:

$$L_{pot} = K_{pot} \times T_{med}$$

(23)

$$L_{pot} = 0,43 \left[ \frac{\%}{^{\circ}C} \right] \times 29,9 [^{\circ}C] = 12,85 \%$$

Cujo:

$K_{pot}$  é o coeficiente de perda por temperatura para potência de pico, disponível no manual do fabricante do MF e  $T_{med}$  é a temperatura calculada do ambiente.

Sabendo o percentual de perda, pede-se calcular a potência de pico compensada ( $P_n \text{ mod. comp}$ ) pela Equação 24:

$$P_n \text{ mod. comp} = P_n \text{ mod} \times (100 - L_{pot})$$

(24)

$$P_n \text{ mod. comp} = 315 [W] \times (100 - 12,85)[\%] = 274,52 W$$

### 11.1.2 Compensação por fator de temperatura da Tensão

A perda por temperatura na tensão ( $L_v$ ) dos MF é calculada pela equação 25:

$$L_v = K_v \times T_{max}$$

(25)

$$L_v = 0,34 \left[ \frac{\%}{^{\circ}C} \right] \times 85 [^{\circ}C] = 28,9 \%$$

Cujo:

$K_v$  é o coeficiente de perda de tensão por temperatura, disponível no manual do fabricante do MF.

As tensões compensadas ( $V_{mp,comp}$  e  $V_{oc,comp}$ ) são, então, calculada pela Equações 26 e 27:

$$Voc.c = Voc \times (100 - Lv)$$

(26)

$$Voc.c = 45,38 [V] \times (100 - 28,9)[\%] = 32,26 V$$

$$Vmp.c = Vmp \times (100 - Lv)$$

(27)

$$Vmp.c = 36,6 [V] \times (100 - 28,9)[\%] = 26,02 V$$

### 11.1.3 Compensação por fator de temperatura da Corrente

O ganho de corrente por temperatura dos MFs (Li.comp) é calculado pela Equação 28:

$$Li = Ki \times Tmax$$

(28)

$$Li = 0,065 \frac{[\%]}{[^{\circ}C]} \times 85 [^{\circ}C] = 5,52 \%$$

Cujo:

Ki é o coeficiente de ganho por temperatura para a corrente, valor disponível no manual do fabricante do MF.

As correntes compensadas (Imp.comp e Isc.comp) são, então, calculada pelas Equações 29 e 30:

$$Isc.c = Isc \times (100 - Lv)$$

(29)

$$Isc.c = 9,5 [A] \times (100 - 5,52)[\%] = 8,97 A$$

$$Imp.c = Imp \times (100 - Lv)$$

(30)

$$Imp.c = 8,61[A] \times (100 - 5,52)[\%] = 8,13 A$$

## 11.2 Correção do valor da radiação solar

Para a correção do valor de radiação solar sobre os MF é essencial calcular o ângulo de inclinação dos painéis. Pela Equação 6, o valor da inclinação ideal pode ser determinado, utilizando o valor da latitude do local, 3,4129° S, logo:

$$\beta = 3,7 + 0,69 \times 3,96^\circ = 6,24^\circ$$

No entanto, conforme discutido neste trabalho, uma inclinação menor do que 10° não é recomendada. Logo, para este projeto será considerada a inclinação mínima recomendada,  $\beta = 10^\circ$ .

Para esta inclinação os valores de HSP sofrem pequenas alterações em relação aos valores já mencionados neste trabalho. Como consta na Tabela 6:

Tabela 6: Disponibilidade solar para inclinação de 10° – Município de Caucaia-CE.

<b>DISPONIBILIDADE SOLAR PRÓXIMO AO LOCAL</b>	
<b>INFORMAÇÕES GERAIS</b>	
<b>FONTE</b>	<b>SOFTWARE RADIUSOL 2</b>
<b>LOCAL</b>	<b>CAUCAIA-CE</b>
<b>INCLINAÇÃO</b>	<b>10 °</b>
<b>DADOS [ KW/m<sup>2</sup>.dia]</b>	
<b>Janeiro</b>	<b>5,64</b>
<b>Fevereiro</b>	<b>5,40</b>
<b>Março</b>	<b>5,36</b>
<b>Abril</b>	<b>4,80</b>
<b>Mai</b>	<b>5,31</b>
<b>Junho</b>	<b>4,99</b>
<b>Julho</b>	<b>5,48</b>
<b>Agosto</b>	<b>6,15</b>
<b>Setembro</b>	<b>6,24</b>
<b>Outubro</b>	<b>6,57</b>
<b>Novembro</b>	<b>6,57</b>
<b>Dezembro</b>	<b>6,09</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>5,71</b>

Fonte: Elaborada pelo autor através Do Software RadiaSol 2 ®.



### **11.3. Outras perdas importantes**

Além das perdas relacionadas à temperatura e a irradiação solar, outros parâmetros de perdas necessitam ser considerados em um projeto de SFCR.

#### **11.3.1 Sombreamento**

Devido o sombreamento parcial de um módulo ou conjunto de módulos, ocasionados por árvores, edifícios próximos e nuvens, as curvas de potência e corrente apresentam irregularidades, afetando a eficiência do sistema fotovoltaico. Para esta perda é determinado um fator de correção ( $K_{somb}$ ) que varia de 1% a 10%, dependendo das condições de sombreamento do local. (MELO. E.G 2012).

A área onde fica localizada a fábrica de polpas não possui edifícios próximos, no entanto, devido à presença de árvores e a possibilidades de dias nublados, foi considerado para este projeto um valor de  $K_{somb}$  de 2%.

#### **11.3.2 Sujeiras nos MFs**

Devido o acúmulo de impurezas nos módulos fotovoltaicos provenientes de fezes de animais, fuligem e poeira do ambiente, a eficiência do sistema também é alterada. Conseqüentemente, um fator de perda por sujeira ( $K_{suj}$ ) precisa ser analisado.

Como a fábrica fica localizada em uma região rural, onde estão presentes muitos pássaros e poeira provenientes das ruas que não são asfaltadas, um fator de perda por sujeira considerável,  $K_{suj}$  de 3%, foi determinado para este projeto. (SUN VOLT ENERGIA SOLAR).

#### **11.3.3 Compensação de perdas de conversão CC/CA**

Devido um déficit de energia na entrada para a energia que sai, a eficiência máxima do inversor também deve ser levada em consideração. Assim para o inversor escolhido, a eficiência máxima de conversão é dada por  $\eta_{inv} = 98,27\%$ .

## 11.4 Redimensionamento do SFCR

Após a determinação dos coeficientes de perdas, Tabela 7, o coeficiente global,  $K_G$ , pode ser calculado multiplicando os coeficientes considerados pelo projetista.

Tabela 7: Coeficientes de perdas consideradas pelo projetista.

COEFICIENTES DE PERDAS		
K	%	Valor
Ksomb	3	0,97
Ksuj	2	0,98
Kinv	1,73	0,982
KG		0,94

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 11.4.1 Potência corrigida do SFCR

Sabendo o valor do coeficiente global de perda, a potência corrigida do SFCR ( $POT.SFCR.c$ ) para atender metade da energia demandada pela unidade consumidora pode ser determinada pela Equação 31:

$$POT.SFCR.c = \frac{POT.SFCR}{KG} \quad (31)$$

$$POT.SFCR.c = \frac{284,93}{0,94} [KW] = 303,117 KW$$

### 11.4.2 Cálculo do número de MF corrigido

O numero de MF corrigido ( $N^{o}mod.c$ ) é determinado pela Equação 32:

$$N^{o}mod.c = \frac{POT.SFCR.c}{Pn.mod.c} \quad (32)$$

$$N^{\circ} mod. c = \frac{303,117 [KW]}{274,52 [W]} = 1104 \text{ und}$$

#### 11.4.3 Número máximo corrigido de MF por inversor

A quantidade máxima corrigida de MF ( $N^{\circ} max. mod. c$ ) a serem conectados ao inversor é calculada pela Equação 33:

$$N^{\circ} max. mod. c = \frac{Pcc. max. inv}{Pn. mod. c} \quad (33)$$

$$N^{\circ} max. mod. c = \frac{300 [KW]}{274,52 [W]} = 1\ 093 \text{ und}$$

Cujo:

$Pn.mod.c$  é a potência nominal corrigida do MF.

#### 11.4.4 Número máximo de strings em paralelo corrigido

Devido o aumento da temperatura dos MFs a corrente do sistema tende a aumentar, logo, para garantir que o painel forneça um valor de corrente sempre abaixo do máximo permitido pelo inversor, um novo valor corrigido tem que ser calculado de acordo com a Equação 34:

$$N^{\circ} max. string. c = \frac{Icc. max}{Isc. mod. c} \quad (34)$$

$$N^{\circ} max. string. c = \frac{715 [A]}{8,97 [A]} = 79 \text{ und}$$

#### 11.4.5 Número máximo corrigido de MF conectados por string

Para garantir que o painel forneça um valor de tensão sempre abaixo do máximo permitido pelo inversor, um novo valor de número máximo de MF em série ( $N^{\circ} \text{max.mod.s.c}$ ) precisa ser calculado, conforme Equação 35:

$$N^{\circ} \text{max.mod.s.c} = \frac{V_{cc.max}}{V_{oc.mod.c}} \quad (35)$$

$$N^{\circ} \text{max.mod.s.c} = \frac{1000 [V]}{32,26 [V]} = 31 \text{ und}$$

Cujo:

$V_{oc.mod.c}$  é a tensão de circuito aberto corrigida do MF.

#### 11.4.6 Número mínimo corrigido de MF conectados por string

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o número mínimo corrigido de MF conectados por string ( $N^{\circ} \text{min.mod.s.c}$ ) pode ser calculado pela Equação 36:

$$N^{\circ} \text{min.mod.s.c} = \frac{V_{cc.min}}{V_{mp.mod.c}} \quad (36)$$

$$N^{\circ} \text{min.mod.s.c} = \frac{540 [V]}{26,02 [V]} = 20 \text{ und}$$

Cujo:

$V_{mp.mod.c}$  é a tensão de potência máxima corrigida do MF.

Logo, um resumo dos limites reais do SFCR pode ser observado na Tabela

8:

Tabela 8—Limites reais do SFCR.

<b>LIMITES REAIS</b>		
<b>SFCR</b>		
<b>POT.SFCR</b>	<b>303,117</b>	<b>KW</b>
<b>MF</b>		
<b>Pn.mod</b>	<b>274,52</b>	<b>W</b>
<b>N.mod</b>	<b>1104</b>	<b>und</b>
<b>INVERSOR</b>		
<b>Nº max.mod</b>	<b>1093</b>	<b>und</b>
<b>Nº max.mod.p</b>	<b>79</b>	<b>und</b>
<b>Nº max.mod.s</b>	<b>31</b>	<b>und</b>
<b>Nº min.mod.s</b>	<b>20</b>	<b>und</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Não foi necessária a mudança de nenhum dos equipamentos selecionados anteriormente. É possível perceber que as configurações estabelecidas estão dentro dos intervalos aceitáveis do SFCR projetado. A Tabela 9 fornece os valores corrigidos.

Tabela 9 — Configurações corrigidas dos inversores e MF.

<b>CONFIGURAÇÃO CORRIGIDA DOS INVERSORES E MF</b>		
<b>Configuração</b>	<b>Inversor 1</b>	<b>Unidade</b>
<b>Nº de MF em série</b>	<b>26</b>	<b>und</b>
<b>Nº de MF em paralelo</b>	<b>42</b>	<b>und</b>
<b>Total de MF</b>	<b>1092</b>	<b>und</b>
<b>Potência Total (MF)</b>	<b>299,775</b>	<b>KW</b>
<b>FDI</b>	<b>1,00</b>	<b>—</b>
<b>Pcc-max (Inversor)</b>	<b>300</b>	<b>KW</b>
<b>PCA-N (Inversor)</b>	<b>300</b>	<b>KW</b>
<b>0,75% x Pot. Total (MF)</b>	<b>224,831</b>	<b>KW</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

A potência efetiva estimada foi de 300 KW. No entanto, a norma estabelece que o limite aplicável ao SFCR é em cima da potência instalada geradora e não da

compensada. Portanto, de acordo com a norma a potência instalada do sistema seria de  $1092 \times 315 \text{ Wp} \approx 343,98 \text{ KWp}$ .

Juntos, os transformadores da fábrica tem capacidade de 350 KW, logo o valor da potência instalada está dentro do limite disponível pelos transformadores, o que implica que estes não precisarão ser substituídos.

Desta forma, optou-se por manter o SFCR com potência instalada de 344 KW, o que resulta em um total de 1092 MF. As características finais do projeto podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 10— Dados finais do Projeto.

<b>CARACTERÍSTICAS FINAIS DO PROJETO</b>		
<b>Limite Normativo de Potência</b>	<b>344</b>	<b>KW</b>
<b>Nº de MF</b>	<b>1092</b>	<b>und</b>
<b>Pot. Efetiva do SFCR</b>	<b>299,77</b>	<b>KW</b>
<b>% Pot. Efetiva / %Pot. Demandada/2</b>	<b>98,89</b>	<b>%</b>
<b>% pot. Efetiva / %Pot. Demandada Total</b>	<b>49,62</b>	<b>%</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode ser observado na Tabela 10 que serão fornecidos 49,62% da potência demandada para abastecer a fábrica, apenas 0,38% a menos do que foi estabelecido no início do projeto.

## 12 ANÁLISE DE CUSTOS

Diante do investimento aplicado ao sistema de minigeração fotovoltaica, o próximo passo do projeto consiste na análise dos custos do SFCR com o intuito de avaliar o retorno financeiro positivo ao longo dos 20 anos de garantia dos MFs.

Os custos diretos, também conhecidos como LCC (*life cycle cost*), envolvem todas as despesas ao longo da vida útil do sistema. Dentre essas despesas estão relacionados os custos totais para instalar todo o SFCR, os custos de manutenções preventivas e corretivas e o preço que os equipamentos valem ao final da vida útil do sistema.

### 12.1 Custo total do SFCR

O custo total envolve todos os gastos para que o SF entre em operação. Este custo, também conhecido como turn-Key, engloba todos os gastos com equipamentos principais e secundários, assim como ferramentas e utensílios necessários para instalação, gastos extras durante o período de instalação e a mão de obra para implantação do sistema. A Tabela 11 apresenta todos os custos detalhados necessários para implantação do SF.

Tabela 11— Custo total de implantação do SFCR.

CUSTOS PARA IMPLANTAÇÃO DO SFCR		
EQUIPAMENTOS/SERVIÇOS	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
Módulos Fotovoltaicos	R\$ 1.200,00	R\$ 1.310.400,00
Inversor Interativo	R\$ 325.000,00	R\$ 325.000,00
Projeto de Instalação	R\$ 120.000,00	R\$ 120.000,00
Estrutura de fixação	R\$ 100.000,00	R\$ 100.000,00
Medidor Bidirecional	R\$ 400,00	R\$ 400,00
Custos Extras	R\$ 30.000,00	R\$ 30.000,00
<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 1.885.800,00</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores foram estimados de acordo com o valor de mercado atual de cada componente.

## 12.2 Custos de manutenção

Os gastos com manutenção preventiva consistem na verificação dos painéis fotovoltaicos, inversores e cabos, para que se possa manter o máximo de eficiência possível do sistema, prevenindo graves avarias que podem provocar baixas na produção de energia elétrica e perdas de eficiência. O valor mais utilizado para estimar as despesas com manutenção preventiva anual varia entre 0,5% e 1% do custo total do SF instalado. (CARNEIRO. S.A 2016). Para este projeto foi estimado o custo inicial de MP em 0,5% do investimento total. Logo, os custos em relação ao primeiro ano com MP será de aproximadamente R\$ 9.429,00.

A manutenção corretiva (MC) para SFCR consiste basicamente na troca dos equipamentos principais, principalmente, os inversores interativos. Apesar de possuírem garantia de 5 anos, estes equipamentos tem em média uma vida útil de 10 anos.

Os gastos com manutenção devem levar em consideração os valores iniciais ajustados por um fator de redução ( $Fr$ ), relativo à época em que se avalia a operação de manutenção. Este fator pode ser estimado pela Equação 37:

$$Fr = \frac{1}{(1 + D)^t} \quad (37)$$

Cujo:

$D$  é a taxa de desconto e  $t$  o período de tempos, em anos. Para este trabalho, estimou-se uma taxa de desconto de 5%, o que pode ser considerado conservador, visto a grande possibilidade de maiores incentivos a esta fonte de energia no Brasil.



Tabela 12— Custo com manutenção.

CUSTOS COM MANUTENÇÃO PREVENTIVA	
Custo Manutenção/ano	R\$ 9.429.00
Taxa de desconto para Fr	5%
CUSTO COM MANUTENÇÃO CORRETIVA	
Troca dos Inversores (11 <sup>o</sup> ano)	R\$ 323.000,00
fr (10 anos)	0,6139

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 12.3 Valor da energia gerada

A economia anual, em reais, pode ser determinada com base na equação 38:

$$Economia\ anual = TE \times Pn.SFCR.comp \times HSP.c \times 365 \quad (38)$$

Cujo:

TE é a tarifa para consumo média estabelecida pela COELCE. Este valor pode ser encontrado na conta de luz do consumidor. Para este projeto, o valor tarifário para o cliente é de R\$ 0,242 por KWh. Segundo Conceição Ana (2016), a inflação brasileira para os próximos anos será em média de 6.5%. Logo, a correção anual adotada para o TE será de 6,5 %.

Pn.SFCR é a potência nominal do SFCR compensada que leva em consideração a potência efetiva do sistema (abatidos suas perdas por fator de temperatura), mais os índices de degradação anual previstos pelo fabricante dos MFs. O índice de degradação pode ser encontrado no manual do fabricante. Para os MFs escolhidos para este projeto, o índice de degradação máximo é de 0,5% ao ano.

HSP é o valor médio da radiação solar diária corrigida para o plano dos MFs. Para o ângulo de inclinação dos MFs estabelecido, 10°, foi determinado o valor médio de HSP de 5,71 KW/m<sup>2</sup>.dia.

De acordo com os dados citados a cima, a Tabela 13 mostra o fluxo de caixa do SFCR dimensionado para fábrica de polpas.

Tabela 13— Análise financeira do projeto fotovoltaico da fábrica de polpas.

ANÁLISE DO INVESTIMENTO DO PROJETO FOTOVOLTAICO DA FÁBRICA DE POLPAS						
Ano	Pot. Nominal do SFCR comp. [KW]	Prod.Anuar de Energia [KWh]	Tarifa Consumo [R\$/KW]	Valor da Energia Gerada [R\$]	Custos [R\$]	Balanco Acumulado [R\$]
2016			0,242	0	R\$ 1.885.800,00	R\$ 1.885.800,00
1	299,770	624.765,65	0,258	R\$ 161.189,54	R\$ 9.429,00	R\$ 1.734.039,46
2	298,271	621.641,50	0,302	R\$ 187.735,73	R\$ 9.339,00	R\$ 1.555.642,73
3	296,779	618.531,95	0,322	R\$ 199.167,29	R\$ 9.254,29	R\$ 1.365.729,73
4	295,295	615.439,07	0,352	R\$ 216.634,55	R\$ 9.174,34	R\$ 1.158.269,52
5	293,800	612.322,23	0,380	R\$ 232.927,38	R\$ 9.102,45	R\$ 934.444,59
6	292,308	609.213,30	0,409	R\$ 249.046,40	R\$ 9.034,52	R\$ 694.432,71
7	290,816	606.104,37	0,437	R\$ 264.988,83	R\$ 8.970,77	R\$ 438.414,65
8	289,324	602.995,45	0,466	R\$ 280.754,68	R\$ 8.910,05	R\$ 166.570,02
9	287,833	599.886,52	0,494	R\$ 296.343,94	R\$ 8.852,61	R\$ 120.921,31
10	286,341	596.777,60	0,522	R\$ 311.756,62	R\$ 8.798,28	R\$ 182.037,02
11	284,849	593.668,67	0,551	R\$ 326.992,70	R\$ 331.746,83	R\$ 177.282,90
12	283,358	590.559,74	0,579	R\$ 342.052,20	R\$ 8.698,12	R\$ 510.636,98
13	281,866	587.450,82	0,608	R\$ 356.935,12	R\$ 8.651,99	R\$ 348.283,13
14	280,374	584.341,89	0,636	R\$ 371.641,44	R\$ 8.608,29	R\$ 711.316,28
15	278,883	581.232,96	0,664	R\$ 386.171,18	R\$ 8.566,88	R\$ 1.088.920,58
16	277,391	578.124,04	0,693	R\$ 400.524,33	R\$ 8.527,63	R\$ 1.480.917,28
17	275,899	575.015,11	0,721	R\$ 414.700,90	R\$ 8.490,42	R\$ 1.887.127,76
18	274,407	571.906,18	0,750	R\$ 428.700,87	R\$ 8.455,14	R\$ 2.307.373,49
19	272,916	568.797,26	0,778	R\$ 442.524,27	R\$ 8.421,68	R\$ 2.741.476,08
20	271,424	565.688,33	0,806	R\$ 456.171,07	R\$ 8.389,93	R\$ 3.189.257,21

Fonte: Elaborada pelo autor.

Diante dos cálculos realizados, pode-se observar que o tempo de *payback* do investimento ocorre no 9º ano de operação do sistema.

## 13 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O SFCR projetado possui potência instalada de 344 KW, valor este, que respeita a capacidade máxima dos transformadores do local. Este valor corresponde a 1092 MF de 315 Wp do fabricante Globo Brasil e 1 inversor interativo de 300 KW do fabricante WEG.

No entanto, devido à compensação de valores, o dimensionamento desenvolvido ao longo do projeto fornece uma solução possível para implantação de um SFCR com potência efetiva de 299,78 KW. Sistema, o qual é capaz de suprir 49,62% da demanda do consumo de energia elétrica da fábrica de polpas, ocupando uma área de 2118 m<sup>2</sup>, o que consiste na produção de 624 MWh por ano. Valores que resultam em uma economia de mais de R\$ 160.00,00 no primeiro ano (com base na tarifa mensal da conta de luz do mês de abril de 2016), compensando o capital investido no 9º ano de operação.

Diante das análises iniciais, pode-se constatar que o projeto esta dentro dos limites estabelecidos no início do dimensionamento. Foi constatado que a área disponível para implantação dos MF, voltados para Norte, era de 2125 m<sup>2</sup>, logo 99 % desta área prevista será ocupada. Assim como, a tensão equivalente do sistema, 676 V está dentro do intervalo de MPPT do inversor interativo, o que garante que o equipamento funcione com alto rendimento.

Para instalação do sistema, será necessária a solicitação do aumento da potência disponibilizada pela COELCE, de 221 KW para 350KW. Este incremento corresponderá a um acréscimo no valor da demanda contratada da unidade consumidora. No entanto, este valor é irrelevante diante do valor final da conta da fábrica, R\$ 30.430,00, assim como não causará mudanças relevantes na análise financeira disponível na tabela 14.

A Tabela 14 contém todos os dados finais do projeto:

Tabela 14— Dados finais do projeto.

RESULTADO FINAL DO PROJETO			
Parâmetro	Simbologia	Dados	Unidade
Inclinação do MF	—	10	°
HSP médio	HSP	5,71	KW/m <sup>2</sup> .dia
Potência nominal do MF	Pn.mod	315,00	W
Fator de correção	Ctemp	12,85	%
Potência corrigida do MF	Pn.mod.c	274,52	W
Nº de módulos	Nº. mod	1.092	und
Nº de strings	Nº string	42	und
Nº de módulos em série por string	Nº mod.s	26	und
Área do módulo	A.mod	1,94	m <sup>2</sup>
Área total	A.total	2.118,86	m <sup>2</sup>
Tensão Máxima do módulo	Vmp	36,60	V
Fator de correção	Ctemp	28,90	%
Tensão máxima corrigida do MF	Vmp.c	26,02	V
Tensão equivalente da fileira	Veq	675,52	V
Corrente máxima potência	Imp	8,61	A
Fator de correção	Ctemp	5,52	%
Corrente máxima potência corrigida	Imp.c	8,13	A
Corrente equivalente por string	Ieq	341,46	A
Comprimento da fileira	Lm	25,8	m <sup>2</sup>
Peso do sistema	Wtotal	29.484	Kg
Potência instalada do SFCR	Pot.inst	343,98	KW
Potência efetiva do SFCR	Pot.ef	299,78	KW
Capacidade por m <sup>2</sup>	—	141,47	W/m <sup>2</sup>
Custo dos SFCR	—	1.885.800,00	R\$
Custo por KW instalado	—	5.232,86	R\$
Economia anual inicial	—	160.386,20	R\$
% pot. Efetiva / %Pot. Demandada Total	—	49,62	%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o intuito de aprofundar a análise deste projeto, uma simulação computacional, Figura 14, foi elaborada para testar a viabilidade dos resultados obtidos. Informações semelhantes sobre os MF e inversores, bem como a potência nominal desejada e a orientação dos módulos foram estabelecidas na simulação. No entanto, alguns valores não foram possíveis de serem estabelecidos na simulação, como HSP

preciso da região. Assim, foi estimado um valor para região mais próxima. A simulação foi executada com sucesso, apenas um erro foi identificado para temperaturas inferiores a  $-10^{\circ}\text{C}$ , mas ele pode ser descartado, já que essas temperaturas são inexistente na região Nordeste do Brasil.

Figura 14 – Simulação do SFCR no software PVsyst.

Définition d'un système réseau, Variante "Nouvelle variante de simulation"

### Configuration globale du système

1 Nombre de types de sous-champs

Schéma simplifié

### Résumé système global

Nombre de modules	1092	Puissance PV nominale	344 kWp
Surface modules	2119 m <sup>2</sup>	Puissance PV maximale	338 kWdc
Nbre d'onduleurs	1	Puissance AC nominale	300 kWac

---

Champ PV

### Sub-array name and Orientation

Name: Champ PV

Orient: **Plan incliné fixe**

Tilt: 10°  
Azimuth: 0°

### Aide au dimensionnement

No Sizing    Entrez Pnom désirée: 344.0 kWp

... ou surface disponible: 2119 m<sup>2</sup>

### Sélection du module PV

Tous les modules

All Manufacturers: 315 Wp 31V Si-poly GBR315p Global Brasil Manufacturer 2C

Dimens. des tensions :p (60°C) 31.0 V  
Voc (-10°C) 50.6 V

Use Optimizer

### Sélection de l'onduleur

Tous les onduleurs

All Manufacturers: 300 kW 540 - 1000 V 50/60Hz SIW700 T1330-33 SIW

Nbre d'onduleurs: 1

Tension de fonctionnement: 540-1000 V    Puissance globale ond.: 300 kWac  
Tension entrée maximale: 1000 V

50 Hz  
 60 Hz

### Dimensionnement du champ

#### Nombre de modules et chaînes

Mod. en série: 26 (entre 18 et 19)

Nb. chaînes: 42

Perte sur-puissance: 0.0 %  
Rapport Pnom: 1.15

Nbre modules: 1092    Surface: 2119 m<sup>2</sup>

#### Conditions de fonctionnement

Vmpp (60°C): 805 V  
Vmpp (20°C): 958 V  
Voc (-10°C): 1315 V

Irradiance plan: 1079 W/m<sup>2</sup>

Imp (GMax): 402 A  
Isc (GMax): 436 A  
Isc (aux STC): 399 A

La tension Voc du champ à -10 °C est plus grande que la tension maximale admissible à l'entrée onduleur

Max. données     STC

Puiss. max. en fonctionnement à 1079 W/m<sup>2</sup> et 50°C: 338 kW

**Puiss. nom. champ (STC): 344 kWp**

System summary

X Annuler

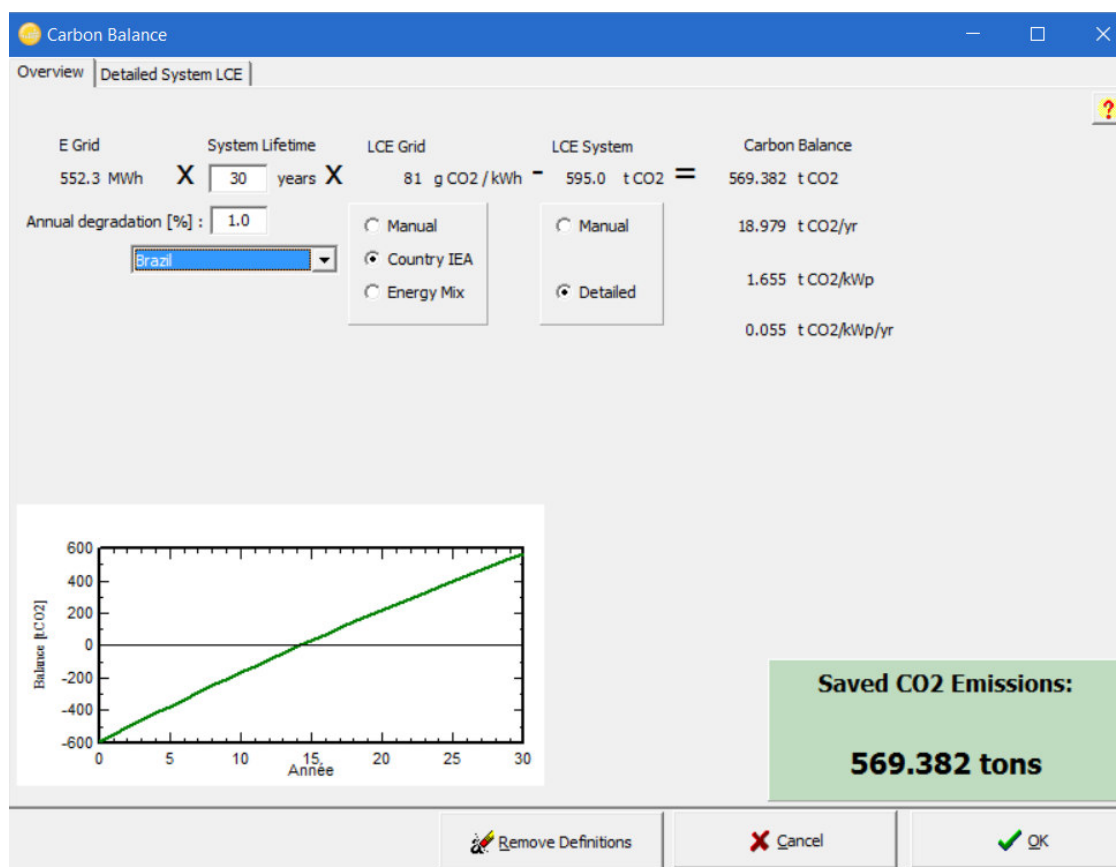
✓ OK

Fonte: PVsyst ®.

Além de simular o dimensionamento do SFCR, o software PVsyst também possui uma ferramenta bastante importante capaz de calcular o valor de emissão de CO<sub>2</sub> que deixaram de ser emitidos no meio ambiente, a partir da produção de energia limpa do sistema simulado. Como consta na Figura 15, 19 toneladas de CO<sub>2</sub> podem ser salvas por ano apenas com a implantação deste SFCR.

Fato que comprovam que esta fonte renovável deve ser uma das principais alternativas para que o país cumpra a promessa que fez em 2015, na Conferência do Clima (COP21), para 2030, em que o país teria de emitir nesse ano cerca de 1,16 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, praticamente o mesmo nível do ano de 2012.

Figura 15 — Simulação do balanço de carbono.



Fonte: PVsyst ®.

As informações completas da simulação estão disponíveis no anexo C.

## 14 CONCLUSÃO

Diante dos objetivos estabelecidos, conclui-se que o foi elaborado, com êxito, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Foi verificado que há disponibilidade de espaço e condições físicas favoráveis ao desenvolvimento da instalação do sistema dimensionado, constatando que, caso haja interesse e recursos financeiro suficientes para elaboração e implantação do projeto, é possível concretizá-lo.

Os resultados encontrados foram considerados válidos, com respaldo em resultados da simulação computacional. Com base nos cálculos, o sistema dimensionado é capaz de produzir 624 MWh por ano, enquanto que a simulação computacional dimensionou o sistema para produzir 552 MWh por ano, uma diferença de 12 %. Esta diferença foi observada ao contabilizar as perdas de eficiência associadas a todos os componentes e às condições de operação. Tais fatores tem impacto sobre a geração final de energia prevista. Por prever perdas mais significativas, a modelagem computacional se mostrou mais conservadora.

É possível confirmar a viabilidade técnica para a aplicação do sistema fotovoltaico, atendendo satisfatoriamente às exigências propostas. A orientação dos telhados e a insolação elevada e constante foram fatores positivos para o aproveitamento do recurso solar. A potência requerida para atender 50% da demanda de energia do consumidor foi alcançada utilizando metade da área do telhado da fábrica, deixando espaço livre para que sejam feitas as devidas manutenções no sistema.

Apesar do investimento inicial elevado, R\$ 1.885.800,00, a análise financeira do projeto comprovou que o tempo de retorno para o investimento necessário à sua instalação, dar-se-á entre o 8º e 9º ano de operação da planta.

## 15 REFERÊNCIAS

ABRADEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA; Balanço Energético Nacional 2014 – Resultados Preliminares <[www.abradee.org.br](http://www.abradee.org.br)> BEN, 2008. Acesso em: 03/07/2016.

ANEEL– AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA –Fontes hidráulicas geram a maior parte da energia elétrica<<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/fontes-hidraulicas-geram-a-maior-parte-da-energia-eletrica>> Acesso em: 03/07/2016.

CLEAN ENERGY COUNCIL. Grid- connected solar PV systems. Melbourne, 2013.

COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ (COELCE). NT-Rr 010/2015: Conexão de micro e minigeração distribuída ao sistema elétrico da AMPLA/COELCE. Fortaleza,2015.

ENERGY MARKET AUTHORITY. Handbook for Solar photovoltaic (PV) systems.Singapore: EMA, 2009.

FOSTER, R; GHASSEMI, M; COSTA, A. Solar energy: renewable energy and environment. Boca Raton: CRC Press, 2009.

GLOBO BRASIL –Produtos – Destaques–GBR315pelétrica <<http://www.paineisglobobrasil.com.br/view-album/16/gbr315p>> Acesso em: 25/06/2016.

GREEN PRO. Energia fotovoltaica – Manual sobre tecnologia, projeto e instalação. Site, 2004. Disponível em: <http://whatisgreenpro.org>. Acesso em 28 de junho.2016.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; Statistics –Latest statistics and news. <<http://www.iea.org/statistics/> > Acesso em: 03/07/2016.



INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normas climatológicas do Brasil.  
<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>> Acesso em:  
02/07/2016.

MACEDO, C. LUIS E MACÊDO, N. WILSON; Curso Teórico Prático de Especialização a Nível Técnico Sobre Sistemas Fotovoltaicos – Eletrificação Predial e Bombeamento de Água – p.1-113; Alter do Chão, Santarém – Pará - 2010.

MELO, G. EMERSON; GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA: estimativa do fator de sombreamento e irradiação em modelos tridimensionais de edificações. São Paulo, 2012.

PALZ, W. Energia Solar e Fontes Alternativas. 1ª ed. Curitiba: Hemus, 2002.

PINHO, T. JOÃO; Sistemas Híbridos, Soluções Energéticas para a Amazônia; 1ª Edição Brasília – Ministério de Minas e Energia p. 37-76.

PORTAL SOLAR – ENERGIA SOLAR – ENERGIA FOTOVOLTAICA –  
<<http://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html> > Acesso em: 03/07/2016.

Resolução Normativa N° 414, 9 de setembro de 2010. Estabelece as condições gerais de funcionamento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 set. 2010. Seção 1, p.115.

Resolução Normativa N° 482, 17 de abril de 2002. Estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 abr. 2012. Seção 1, p.53.

Resolução Normativa N? 687, 24 de novembro de 2015. Alerta a resolução normativa N? 482, de 17 de abril de 2012 e os módulos 1 e 3 dos procedimentos de distribuição ? PRODIST. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 dez. 2015. Seção 1, p.45.

SOUZA, R.di. Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica. Ribeirão Preto: Blue Sol Solar,2014.

Sun Volt Energia Solar. A falta de limpeza das placas reduz a produção de energia solar. Site 2015; Disponível em:  
<http://www.sunvoltenergiasolar.com.br/a-falta-de-limpeza-das-placas-solares-reduz-a-producao-de-energia/>

TOLMASQUIN, M.T. Fontes Renováveis de Energia no Brasil.1ª ed. Rio de Janeiro: Internacional, 2003. Acesso em: 02 jul. 2016.

VILLALVA, M.G. Energia Solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012.

WINKENERGIA. Preço do silício cai 70% em menos de um ano nos EUA. Site 2009. Disponível em  
[http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Pre%C3%A7o\\_do\\_sil%C3%ADcio\\_cai\\_70%25\\_em\\_menos\\_de\\_um\\_ano\\_nos\\_EUA](http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Pre%C3%A7o_do_sil%C3%ADcio_cai_70%25_em_menos_de_um_ano_nos_EUA). Acesso em: 27maio. 2016.

WORLDOMETERS. World population sections. Site, 2016. Disponível em:  
<<http://www.worldometers.info/world-population/>> Acesso em: 02 jul. 2016.

## ANEXO A — FICHAS TÉCNICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS


**GLOBO BRASIL**  
Indústria Brasileira de Painéis Solares

# GBR 250-265 GBR 300-320

Módulo Fotovoltaico de Silício Policristalino



CARACTERÍSTICAS
<b>CÉLULA</b> 60 Células - Policristalina - 156x156mm 72 Células - Policristalina - 156x156mm
<b>TAMANHO</b> 1640 x 990 x 40mm 1956 x 992 x 40mm
<b>PESO</b> 19kg 27kg
<b>VIDRO</b> 3.2mm - 4.0mm Temperado - Baixo Teor de Ferro Prismático - Anti-Reflexo - Antisujidade
<b>MOLDURA</b> Alumínio Anodizado Fosco
<b>CAIXA DE JUNÇÃO</b> Weidmüller - 3 Diodos - IP67
<b>CABOS</b> TÜV 4mm <sup>2</sup> - 800mm
<b>CONECTORES</b> Weidmüller - Compatível MC4
<b>FILME DE PROTEÇÃO</b> Backsheets de alta durabilidade com filmes fluorados Kynar Film® by ARKEMA







Todos os painéis solares produzidos pela GLOBO BRASIL possuem um alto nível de qualidade.

São fabricados com as melhores matérias-primas disponíveis no mundo. A caixa de junção, por exemplo, é da Weidmuller Alemanha e oferece diversas vantagens. Assim como o selante PV-804 da Dow Corning, produzido na Holanda e o filme de proteção de alta durabilidade Kynar Film® by ARKEMA.



**16,50%**

Excelente Eficiência Energética até 16,50%



Alto Desempenho em Baixa Irradiação



Tolerância de Potência Positiva de até 5W



Teste Individual de Potência e EL



Caixa de Junção IP67 Protegida contra Imersão



Resistência à maresia e intempéries

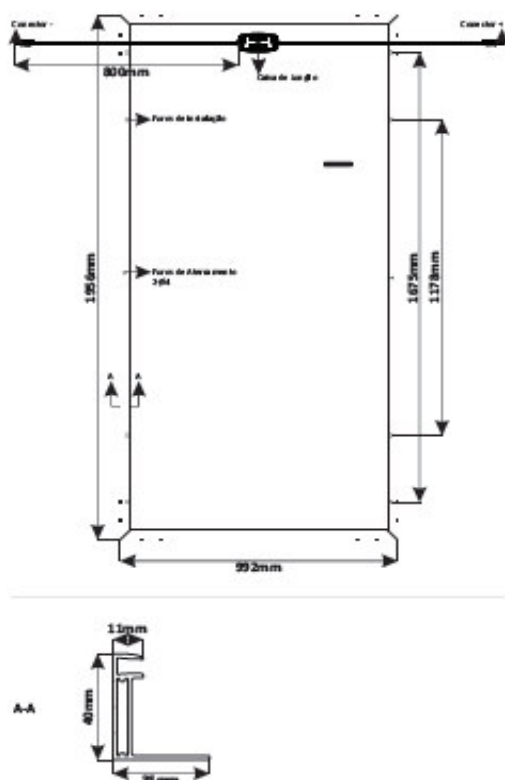
## PERFORMANCE ELÉTRICA

### GBR 300-320

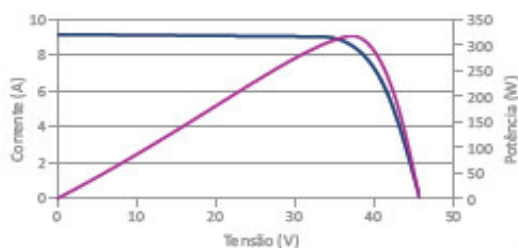
STC	GBR300p	GBR305p	GBR310p	GBR315p	GBR320p
Potência Nominal Máxima (Pmax)	300W	305W	310W	315W	320W
Tensão de Potência Máxima (Vmp)	35.22V	35.8V	36.3V	36.6V	37.1V
Corrente de Máxima Potência (Imp)	8.52A	8.53A	8.56A	8.61A	8.63A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	45.04V	45.20V	45.57V	45.38V	45.44V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	9.02A	9.19A	9.32A	9.50A	9.79A
Eficiência do módulo	15,50%	15,70%	16,00%	16,20%	16,50%
Temperatura de Operação	-40°C a + 85°C				
Tensão Máxima do Sistema	1000 V DC (IEC)				
Corrente Máxima por Fusíveis em Série	20 A				
Tolerância de Potência	0~+5W				
Produção Média Mensal de Energia	37,5kWh	38,13kWh	38,75kWh	39,38kWh	40,0kWh

Condição padrão de teste STC: temperatura ambiente de 25°C e irradiância de 1000W/m<sup>2</sup>.

## DESENHO TÉCNICO



## CURVA CORRENTE-TENSÃO E POTÊNCIA-TENSÃO (GBR320p)



## CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA

Coefficiente de Temperatura da Pmax	-0,43%/°C
Coefficiente de Temperatura da Voc	-0,34%/°C
Coefficiente de Temperatura da Isc	-0,065%/°C
Temperatura Nominal de Funcionamento da Célula (NOCT)	45±2°C



Todos os painéis solares produzidos pela GLOBO BRASIL possuem classificação energética A na tabela do INMETRO.



**PRODUZIDO NO BRASIL**

**ANEXO B — FICHAS TÉCNICAS DO INVERSOR**

## Automação

Inversor Solar Central SIW700

Inversor String SIW500

Inversor Monofásico SIW300



## Inversor Solar Central SIW700

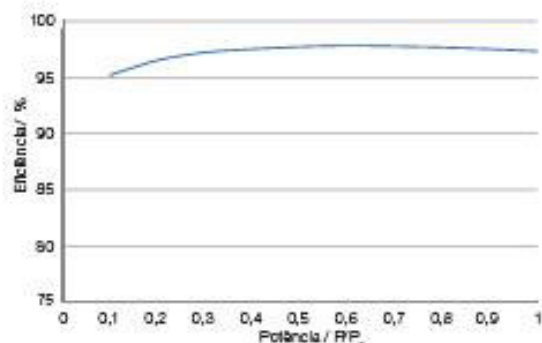
A WEG conta com décadas de experiência no desenvolvimento de inversores de frequência industriais para diversas aplicações. E para atender o mercado de usinas solares, apresentamos a linha de inversores solares SIW700, que possui uma extensa gama de potências, projetada para atender as condições climáticas nacionais.



- Inversor de fabricação nacional
- Produto cadastrado no Finame - BNDES
- Assistência técnica especializada em todo território nacional
- Conceito modular: manutenção simples e rápida
- Tropicalizado
- 10% a mais de potência em ambiente com temperatura de até 40 °C
- Tensão máxima CC de até 1.000 V

### Eficiência

Especialmente desenvolvido para operar durante situações limite do raiar do dia e do pôr do sol, proporciona excelente eficiência desde potências baixas até a potência nominal.



Modelo	SIW700 T330-33	SIW700 T660-33	SIW700 T1000-33	SIW700 T1300-33	SIW700 T1650-33
	<b>Entrada (CC)</b>				
Máxima corrente recomendada	715 A	1.425 A	2.140 A	2.850 A	3.565 A
Tensão máxima	1.000 V				
Faixa do MPPT	540...850 V				
Eficiência estática/dinâmica do MPPT	99,9 / 99,7%				
	<b>Saída (CA)</b>				
Potência nominal (40 °C / 45 °C)	333 / 300 kW	666 / 600 kW	999 / 900 kW	1.332 / 1.200 kW	1.665 / 1.500 kW
Corrente nominal	525 A	1.050 A	1.575 A	2.099 A	2.624 A
Máxima corrente	583 A	1.166 A	1.749 A	2.332 A	2.915 A
Tensão de saída 3Φ	330 V				
Frequência nominal	60 Hz				
Fator de potência	0,9i...1...0,9c				
Distorção harm. total da corrente de saída <sup>1)</sup>	<3%				
Máxima eficiência <sup>2)</sup>	98,65%				
Eficiência europeia <sup>3)</sup>	98,27%	98,47%	98,52%	98,55%	98,58%
	<b>Informações gerais</b>				
Comunicação	RS485, Modbus e USB				
Monitoramento remoto	SCADA WEG				
Temperatura ambiente <sup>3)</sup>	-10...+50 °C				
Grau de proteção	IP20				
Máximo consumo auxiliar	800 W	1.600 W	2.400 W	3.200 W	4.000 W
Consumo em stand-by	200 W				
Consumo noturno	100 W				
Normas	EN 61000 (partes 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6), CISPR 11, EN 55011, EN 50178, IEC 62116, NBR IEC 62116, IEC 62109-1, IEC 62109-2, NBR 16149 e NBR 16150				

Notas: 1) Medição com DHT da tensão da rede menor que 2%.

2) Eficiência dos componentes do painel elétrico.

3) Com limitação de potência acima de 45 °C.

## ANEXO C— RELATÓRIO COMPLETO DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA DIMENSIONADO NO SOFTWARE PVsyst.

PVSYST V6.44		02/07/16	Page 1/3
POLPAS FRUTE			
<b>Système couplé au réseau: Paramètres de simulation</b>			
<b>Projet :</b>	<b>Fábrica de Polpas</b>		
<b>Site géographique</b>	<b>Fortaleza</b>	<b>Pays</b>	<b>Brazil</b>
<b>Situation</b>	Latitude 13.0°S	Longitude	38.5°W
Temps défini comme	Temps légal Fus. horaire TU-3	Altitude	23 m
<b>Données météo:</b>	Albédo 0.20	Caucaia Meteonorm 7.1 (1991-2010) - Synthétique	
<b>Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation</b>			
	Date de la simulation	02/07/16 à 18h21	
<b>Paramètres de simulation</b>			
<b>Orientation plan capteurs</b>	Inclinaison	10°	Azimut 0°
<b>Modèles utilisés</b>	Transposition	Perez	Diffus Perez, Meteonorm
<b>Horizon</b>	Pas d'horizon		
<b>Ombrages proches</b>	Sans ombrages		
<b>Caractéristiques du champ de capteurs</b>			
<b>Module PV</b>	Si-poly	Modèle	GBR315p
Custom parameters definition		Fabricant	Global Brasil
Nombre de modules PV	En série	26 modules	En parallèle 42 chaînes
Nombre total de modules PV	Nbre modules	1092	Puissance unitaire 315 Wc
Puissance globale du champ	Nominale (STC)	344 kWc	Aux cond. de fonct. 314 kWc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)	U mpp	843 V	I mpp 373 A
Surface totale	Surface modules	2119 m <sup>2</sup>	Surface cellule 1914 m <sup>2</sup>
<b>Onduleur</b>			
Custom parameters definition	Modèle	SIW700 T330-33	
Caractéristiques	Fabricant	WEG	
	Tension de fonctionnement	540-850 V	Puissance unitaire 300 kWac
Batterie d'onduleurs	Nbre d'onduleurs	1 unités	Puissance totale 300 kWac
<b>Facteurs de perte du champ PV</b>			
Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m <sup>2</sup> K	Uv (vent) 0.0 W/m <sup>2</sup> K / m/s
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	38 mOhm	Frac. pertes 1.5 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes -0.4 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes 1.0 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Param. bo 0.05
<b>Besoins de l'utilisateur :</b>	Charge illimitée (réseau)		



## POLPAS FRUTE

## Système couplé au réseau: Résultats principaux

**Projet :**                    **Fábrica de Polpas**

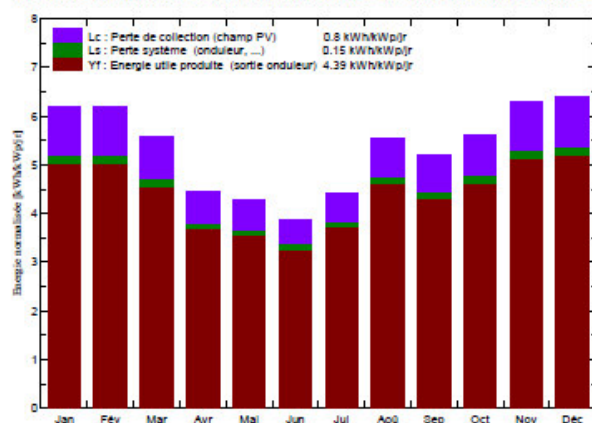
**Variante de simulation :**    **Nouvelle variante de simulation**

<b>Principaux paramètres système</b>	Type de système	<b>Couplé au réseau</b>	
Orientation plan capteurs	inclinaison	azimut	0°
Modules PV	Modèle	Pnom	315 Wc
Champ PV	Nombre de modules	Pnom total	<b>344 kWc</b>
Onduleur	Modèle	Pnom	300 kW ac
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)		

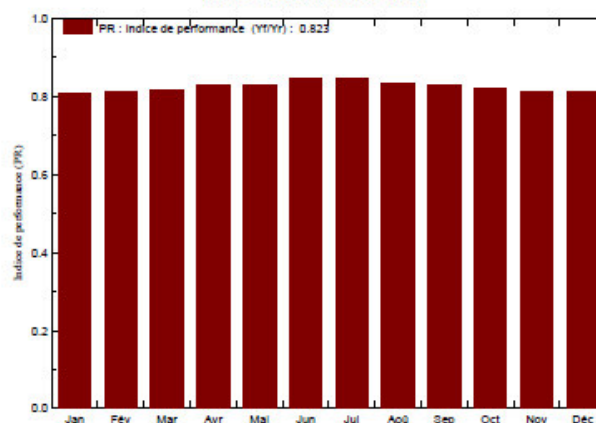
**Principaux résultats de la simulation**

Production du système	<b>Energie produite</b>	<b>551.7 MWh/an</b>	Productible	1604 kWh/kWc/an
	Indice de performance (PR)	82.3 %		

Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 344 kWc



Indice de performance (PR)



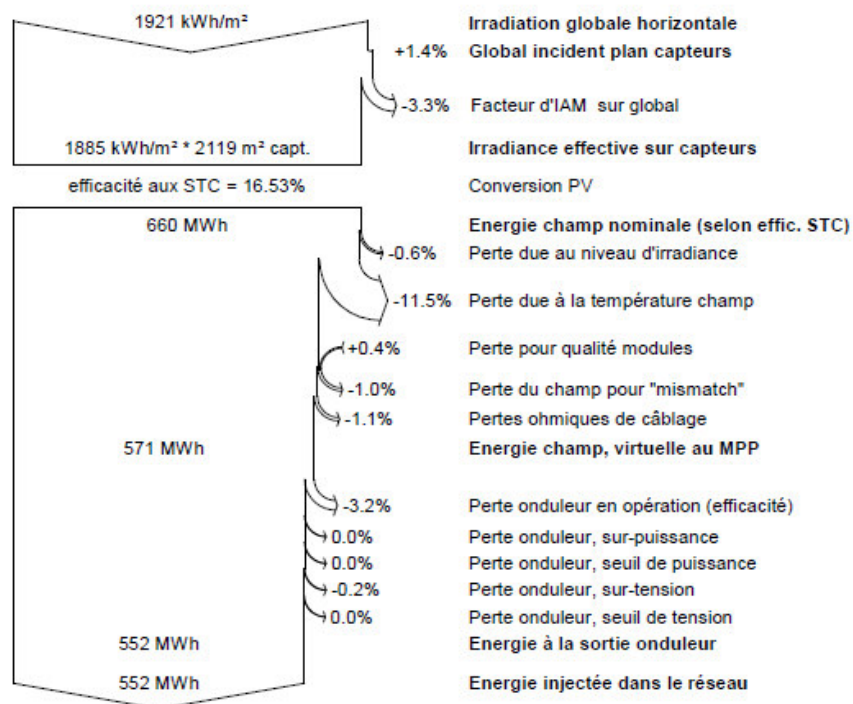
## POLPAS FRUTE

## Système couplé au réseau: Diagramme des pertes

Projet : **Fábrica de Polpas**Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Principaux paramètres système	Type de système	Couplé au réseau	
Orientation plan capteurs	inclinaison	10°	azimut 0°
Modules PV	Modèle	GBR315p	Pnom 315 Wc
Champ PV	Nombre de modules	1092	Pnom total <b>344 kWc</b>
Onduleur	Modèle	SIW700 T330-33	Pnom 300 kW ac
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)		

## Diagramme des pertes sur l'année entière

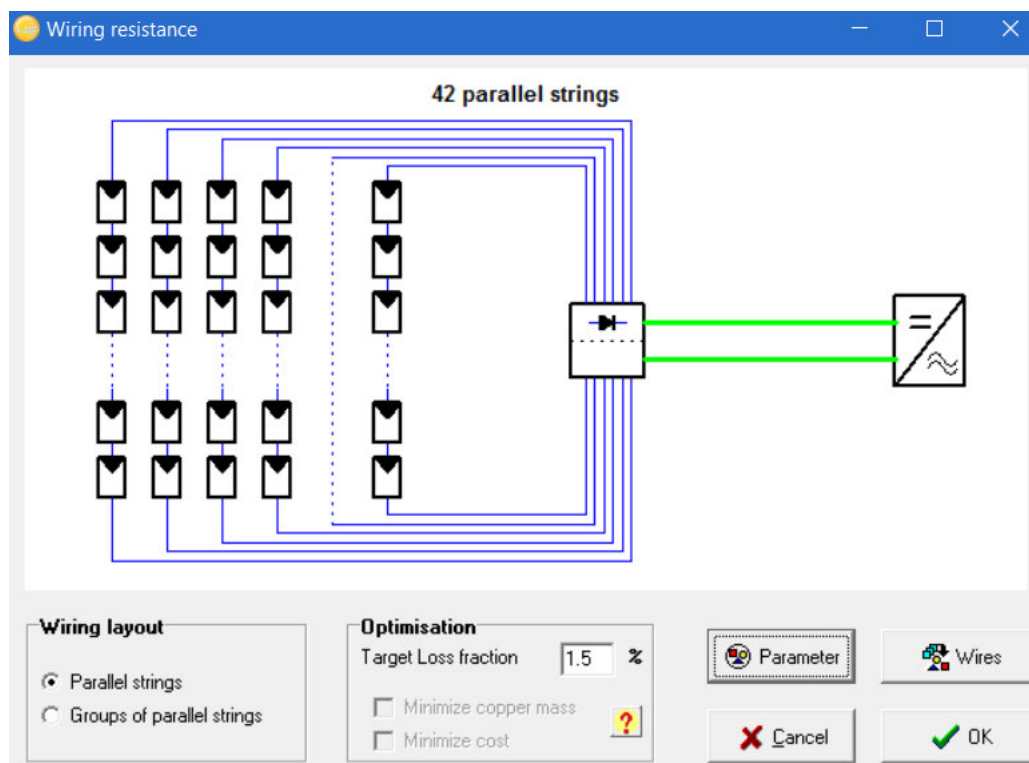


## Nouvelle variante de simulation

## Bilans et résultats principaux

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	T Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	EffArrR %	EffSysR %
Janvier	201.4	27.90	192.4	185.7	55.31	53.53	13.57	13.13
Février	176.7	27.80	173.7	168.2	50.11	48.51	13.61	13.18
Mars	170.4	27.30	173.3	167.8	50.35	48.74	13.71	13.27
Avril	127.5	26.20	133.7	129.2	39.34	38.06	13.89	13.44
Mai	122.8	25.80	132.8	128.3	39.20	37.92	13.93	13.47
Juin	105.9	23.90	116.1	111.8	34.84	33.71	14.16	13.70
Juillet	125.1	23.70	136.7	132.1	41.04	39.72	14.17	13.71
Août	159.3	24.20	171.7	166.6	50.80	49.18	13.96	13.52
Septembre	152.0	25.10	156.2	151.2	46.00	44.53	13.90	13.45
Octobre	175.5	26.80	174.5	168.9	50.94	49.31	13.78	13.34
Novembre	195.8	27.10	189.0	183.1	54.68	52.93	13.65	13.21
Décembre	209.0	27.90	198.5	192.1	57.36	55.52	13.64	13.20
Année	1921.2	26.10	1948.6	1885.1	569.97	551.66	13.80	13.36

Légendes: GlobHor Irradiation globale horizontale EArray Energie effective sortie champ  
T Amb Température ambiante E\_Grid Energie injectée dans le réseau  
GlobInc Global incident plan capteurs EffArrR Effic. Eout champ / surf. brute  
GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages EffSysR Effic. Eout système / surf. brute



**ANEXO D— FOTOS DA ÁREA DISPONÍVEL PARA INSTALAÇÃO DOS MF.**

