

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

USP

Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis

PoliUSP/PECE

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA INSTALAÇÃO  
FOTOVOLTÁICA CONECTADA À REDE EM RESIDÊNCIAS  
URBANAS

Luís Fernando Ruiz

São Paulo

2012



LUÍS FERNANDO RUIZ

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA INSTALAÇÃO  
FOTOVOLTÁICA CONECTADA À REDE EM RESIDÊNCIAS  
URBANAS

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. **Eduardo Ioshimoto**

São Paulo

2012



AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

### FICHA CATALOGRÁFICA

Ruiz, Luís Fernando

Viabilidade técnica e econômica de uma instalação fotovoltaica conectada à rede em residências urbanas / L. F. Ruiz. São Paulo, 2013.  
43 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Energia solar 2. Instalações fotovoltaicas (Viabilidade Técnica e Econômica) 3. Edifícios residenciais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II. T.



# SUMÁRIO

<b>1.</b>	Introdução .....	11
<b>2.</b>	Energia Solar.....	12
2.1.	Energia Solar Fotovoltáica.....	12
2.2.	Célula Fotovoltáica .....	12
2.2.1.	Silício Monocristalino .....	15
2.2.2.	Silício Policristalino.....	16
2.3.	Módulo Fotovoltáico .....	16
<b>3.</b>	Potencial da Energia Solar Fotovoltáica .....	18
3.1.	Potencial Brasileiro.....	19
<b>4.</b>	Futuro da Energia Solar Fotovoltáica .....	21
<b>5.</b>	Dimensionamento de um Sistema Solar Fotovoltáico .....	23
5.1.	Sistema Fotovoltáico Interligado a Rede.....	23
5.2.	Avaliação do Recurso Solar .....	25
5.3.	Arranjo Fotovoltáico.....	28
5.4.	Inversor de Frequência.....	30
5.5.	Medidor Inteligente .....	32
<b>6.</b>	Aplicação em um condomínio de apartamentos residenciais .....	34
6.1.	Cargas e Perfil de Utilização .....	35
6.2.	Dimensionamento do Sistema Fotovoltáico .....	36
6.2.1.	INVERSOR .....	36
6.2.2.	MÓDULOS FOTOVOLTÁICOS .....	40
6.2.3.	CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA .....	40
6.2.4.	INSTALAÇÃO FÍSICA .....	42
<b>7.</b>	Análise Econômica.....	45
7.1.	Custo Real na Instalação Proposta .....	46
<b>8.</b>	Conclusões.....	50
<b>9.</b>	Referências Bibliográficas .....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura atômica dos átomos de boro, silício e fósforo (ABINEE, 2012)	13
Figura 2.2 - Forma construtiva de uma célula fotovoltaica (Algo Sobre).....	15
Figura 2.3 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino (EngenWorks, 2008).....	16
Figura 2.4 - Célula fotovoltaica de silício policristalino (EngenWorks, 2008).....	17
Figura 2.5 - Módulo Fotovoltaico 135W (Suntech Solar).....	17
Figura 3.1 – Irradiação média anual em plano horizontal, kWh/m <sup>2</sup> .dia (ABINEE, 2012) .....	20
Figura 3.2 – Irradiação solar média anual no Brasil (SWERA, INPE) .....	21
Figura 4.1 – Célula Solar Orgânica (Inovação Tecnológica, 2012) .....	22
Figura 5.1 – Sistema Fotovoltáico Conectado à Rede.....	25
Figura 5.2 – Mapa da região da cidade de Sorocaba (Google Maps).....	26
Figura 5.3 – Piranômetro do tipo preto e branco (Atlas Solarimétrico do Brasil, CEPEL) .....	26
Figura 5.4 – Características Elétricas do módulo BYD 240W .....	29
Figura 5.5 – Produtividade de um sistema em função do FDI (MACÊDO, 2007) .....	31
Figura 5.6 - Medidor Ecil MD-1400 (Ecil Energia).....	34
Figura 6.1 –Vista artística panorâmica do condomínio.....	35
Figura 6.2 – Dimensões do telhado .....	36
Figura 6.3 – Inversor de Frequência Eltek Valere 4.4kW .....	39
Figura 6.4 – Terminais de conexão do inversor (Eltek Valere) .....	41
Figura 6.5 – Configuração elétrica dos componentes do sistema fotovoltáico .....	43
Figura 6.6 – Inclinação do módulo fotovoltáicos em relação ao plano horizontal.....	44
Figura 6.7 – Dimensões do módulo fotovoltáico de 240W (BYD .....	45
Figura 7.1 – Crescimento da capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltáica no período de 1995-2011 (REN21) .....	46
Figura 7.2 – Tendência do custo dos módulos ( Euro/Watt ) no período de 20007 a 2011 (PV Magazine).....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Radiação Solar Diária Média Mensal na cidade de Sorocaba .....	27
Tabela 5.2 – Radiação Diária Média Mensal em várias inclinações no plano .....	28
Tabela 5.3 – Especificações de um Inversor de 4.4kW .....	32
Tabela 6.1 – Consumo de Energia da Área Comum do Condomínio .....	36
Tabela 6.2 – Média de Consumo de Energia por Bloco.....	37
Tabela 6.3 – Especificações do Inversor Eltek Valere 4.4kW .....	40
Tabela 6.4 – Soma das médias de consumo de energia dividida nos quatro prédios com telhado voltado para o norte.....	37
Tabela 7.1 – Custo dos componentes principais do sistema fotovoltaico .....	48
Tabela 7.2 – Custo dos componentes e mão de obra para instalação do sistema.....	48
Tabela 7.3 – Retorno simples do investimento no sistema fotovoltaico .....	48
Tabela 7.4 – Retorno do investimento considerando a perda de eficiência dos módulos ao longo do período de garantia.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
FV	Fotovoltaico
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
DSC	Dye-sensitized Solar Cell
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
SP	Sol Pleno
STC	Standard Test Conditions
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PTM	Perdas Totais no Módulo
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21 century

## 1. Introdução

Este trabalho busca apresentar um método prático e claro para a elaboração e implementação de um sistema de captação de energia solar fotovoltaica voltado para residências urbanas, sejam casas ou edifícios de apartamentos. O método utilizado no projeto é exclusivamente o de conexão à rede elétrica da concessionária, visando utilizar-se dos benefícios da nova resolução normativa regulamentada pela ANEEL em abril de 2012, que possibilita a compensação do consumo/produção energética para pequenos e micro produtores. Adicionalmente, é utilizado o método do Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI), que baseia-se em estudos que apontam que o inversor de frequência, um dos componentes mais caros do sistema, não precisa ter necessariamente a mesma capacidade máxima do conjunto de geração fotovoltaica.

Todos os custos para a aquisição dos componentes e mão-de-obra de instalação do sistema são de cotações realizadas no segundo semestre do ano de 2012, junto a empresas distribuidoras idôneas.

## 2. Energia Solar

O planeta Terra recebe anualmente cerca de  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia proveniente da irradiação solar (CEPEL, 2004), sendo esse número equivalente a 10 mil vezes o consumo da energia mundial no mesmo período. Considerando a escala de tempo humana no planeta, pode-se afirmar que o Sol é uma fonte inesgotável de energia, que se captada e convertida tem a capacidade de resolver a maior parte senão todos os problemas energéticos da humanidade.

Porém sem dúvida não se trata de uma tarefa trivial, a conversão da irradiação solar em outras formas mais úteis de energia, principalmente elétrica e térmica, vem sendo tentada desde o século passado e tem se mostrado um grande desafio tecnológico.

### 2.1. Energia Solar Fotovoltaica

Um dos métodos de conversão da energia solar é o chamado efeito fotovoltaico, que consistem na conversão direta da luz solar em energia elétrica. Tal efeito pode ser conseguido através de um componente chamado célula fotovoltaica, construídos normalmente com materiais semicondutores, sendo o silício o mais empregado atualmente. Pesquisas de fronteira vêm mostrando um outro tipo de célula fotovoltaica muito promissora baseado na eletrônica orgânica, onde a célula é constituída de materiais como o carbono.

### 2.2. Célula Fotovoltaica

O funcionamento de uma célula fotovoltaica pode ser explicado utilizando-se do conceito de semicondutores tipo p e n.

O semicondutor é considerado do tipo n quando possui um excesso de elétrons na sua banda de valência, ou seja, possui uma carga elétrica negativa. Esse efeito é obtido dopando o elemento semicondutor, no caso o silício, com um outro elemento que possua mais elétrons que o silício na sua última camada de valência, isso faz com que esses elétrons adicionais fiquem livres para mover-se no cristal de silício. O fósforo, que tem cinco elétrons na sua banda de valência (enquanto o silício possui quatro), o elemento mais utilizado na obtenção do semicondutor tipo n.

Já o semiconductor tipo p é obtido com o processo oposto, ou seja, dopa-se o silício com um elemento que possua menos elétrons que ele na sua banda de valência, criando “lacunas” que resultarão numa carga positiva. O elemento mais comumente usado para esse fim é o boro, que possui três elétrons na sua última camada de valência.

Com isso, se na metade de uma célula de silício for aplicado o elemento fósforo e na outra metade o elemento boro, será obtido o que é conhecido como junção pn, que é a base de funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Figura 2.1 - Estrutura atômica dos átomos de boro, silício e fósforo (ABINEE, 2012)

Partindo do conceito dos semicondutores p e n, já podemos entender com mais facilidade o funcionamento de uma célula solar de uma forma mais detalhada:

- a) No momento em que um fóton atinge o cristal de silício, as possíveis situações podem acontecer: (i) o fóton atravessa o silício sem atingi-lo, no caso dos fótons com maior comprimento de onda e baixa energia. (ii) o fóton reflete no cristal de silício. (iii) se a energia do fóton for superior à necessária para superar o gap de energia no cristal de silício, ele é absorvido.
- b) Considerando que o fóton seja absorvido pelo silício (caso iii), normalmente ele deverá colidir com um elétron localizado na banda de valência (que está fortemente ligado por ligações covalentes) do cristal; se a energia transferida pelo fóton for suficiente, isso irá expulsar o elétron para a banda de condução do silício, onde ele poderá se deslocar livremente.
- c) O elétron expulso de sua ligação covalente deixa uma lacuna na banda de valência, tornando possível que outros elétrons de átomos vizinhos tomem

seu lugar, por sua vez deixando outra lacuna para trás que será ocupada por outro elétron vizinho.

- d) Para a indução da corrente elétrica, é necessária a junção de uma camada de silício do tipo p e uma do tipo n, permitindo que os elétrons livres passem do lado n para o lado p, isso faz com que o lado n fique positivamente carregado (com falta de elétrons) e o lado p negativamente carregado (com excesso de elétrons). Essa transferência de elétrons cessa no momento que esse acúmulo gera um campo elétrico forte o suficiente para barrar a entrada de novos elétrons. Para que o fluxo continue será necessário que um novo fóton com energia suficiente para superar o campo elétrico formado colida e crie uma nova lacuna. Assim, conectando-se um fio em cada extremidade dos cristais p e n cria-se uma circulação de corrente.

## CÉLULA FOTOVOLTAICA

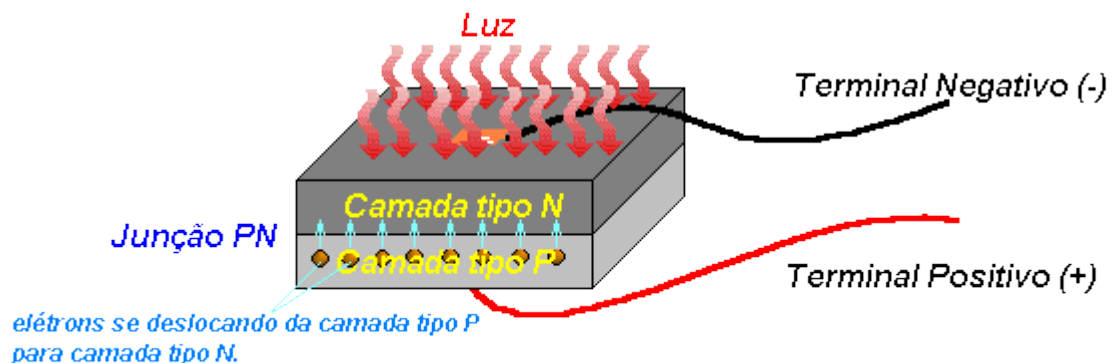


Figura 2.2 - Forma construtiva de uma célula fotovoltaica (Algo Sobre: <http://www.algosobre.com.br/fisica/celula-fotovoltaica.html>)

Para que seja possível a criação da unidade básica de qualquer módulo fotovoltaico, a célula, o material semiconductor no caso o silício, precisa passar antes por um processo de purificação e depois por uma etapa de dopagem, onde será adicionado o elemento responsável por torná-lo do tipo p ou n.

Hoje, os tipos de células mais comumente encontradas comercialmente são do tipo monocristalino (31%) e policristalino (57%). Para que seja possível a sua produção, é preciso que na etapa de purificação o silício atinja o chamado

“silício grau solar”, com 99,9999% de pureza do cristal. O alto teor de pureza necessário torna o processo de produção extremamente complexo e caro, limitando não somente no acesso financeiro aos módulos, mas também na capacidade técnica de produção. Hoje ainda são poucos os países que detêm a tecnologia necessária para produção do silício grau solar.

### 2.2.1. Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino são formadas a partir de um único cristal, em fatias com alto grau de pureza, Esse é o tipo de cristal com o qual se possui a maior experiência de produção, para o qual foi alcançado o maior nível de eficiência de conversão. Para essa tecnologia, o limite teórico de eficiência na conversão da luz do sol em energia elétrica é da ordem de 27%, e comercialmente são encontrados células com valores que variam entre 12% e 16%. Essa tecnologia possui sua maior limitação na redução de custos, dificultada pela grande quantidade de silício necessária e na grande quantidade de energia despendida na produção.



Figura 2.3 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino (EngenWorks,

<http://engenworks.blogspot.com.br/>)

### 2.2.2. Silício Policristalino

O silício policristalino é fabricado a partir do mesmo material utilizado no monocristalino, porém ao invés de ser produzido de um único grande cristal, este é dividido em diversos pequenos cristais de onde são então extraídas várias fatias que serão usadas na produção de uma célula. Devido à interconexão entre as várias fatias de silício, a eficiência teórica dessa célula é reduzida, mas na prática alcança valores bem próximos ao monocristalino.

A grande vantagem deste tipo de célula está nos seus custos de produção, que por serem feitas a partir de vários pequenos cristais ao invés de um grande, necessitam de muito menos energia no processo produtivo.

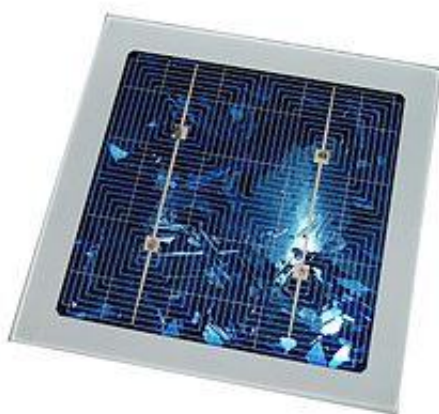


Figura 2.4 - Célula fotovoltaica de silício policristalino (EngenWorks, 2008)

### 2.3. Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico nada mais é do que um agrupamento de várias células fotovoltaicas. Como uma única célula possui uma baixa tensão e capacidade de corrente, se faz necessário interconectar uma grande quantidade delas em arranjos série e paralelo para que se atinja um nível de tensão e corrente úteis.



Figura 2.5 - Módulo Fotovoltaico 135W (Suntech Solar)

Devido à fragilidade das células solares, que em geral possuem uma espessura bem reduzida, também é preciso adicionar uma camada protetora, em geral de vidro temperado, para proteger as células de esforços mecânicos e exposição direta ao ambiente externo.

### 3. Potencial da Energia Solar Fotovoltaica

O imenso potencial energético proveniente da luz solar justifica todo e qualquer investimento e pesquisa necessários para o desenvolvimento dos equipamentos utilizados na sua captação e conversão: o sol despeja cerca de  $1,52 \times 10^{18}$  kWh de energia todos os anos sobre a atmosfera terrestre, e o nosso consumo médio atual está em cerca de  $1,40 \times 10^{14}$  kWh (ABINEE, 2012), ou seja, o aproveitamento de apenas 0,01% dessa energia disponível gratuitamente por nossa estrela seria o bastante para suprir toda a demanda mundial.

É claro que nem toda a energia que chega do sol pode ser aproveitada em solo, a maior parte é absorvida por nossa atmosfera e a porção que chega a superfície depende muito da latitude e longitude em que se pretende aproveitá-la e, ainda irá variar de acordo com as condições atmosféricas do momento, sendo afetada por chuvas, nebulosidade e até mesmo por fumaças provenientes de queimadas. Deste modo, é importante definir os termos (ABINEE, 2012):

**Irradiância solar:** é uma medida de densidade de potência, expressa em  $\text{W/m}^2$  ou  $\text{kW/m}^2$ . Ou seja, é o valor medido instantâneo de um determinado local numa determinado hora.

**Irradiação solar:** é uma medida de densidade de energia, notada como  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$  ou  $\text{kWh/m}^2/\text{ano}$ . É o valor da densidade de potência ao longo de um período de tempo.

A proporção da energia do espectro de radiação solar que chega à superfície terrestre e a energia que o planeta recebe na parte superior da atmosfera é de cerca de 73%. Se multiplicarmos a constante solar, que é o valor medido da energia solar por unidade de área que chega a alta atmosfera, atualmente em  $1.361 \text{ W/m}^2$  por 73%, teremos aproximadamente o valor de  $1000 \text{ W/m}^2$  de energia atingindo a superfície terrestre (ABINEE,2012).

A figura 3.1 mostra a distribuição da radiação solar média no planeta. Claramente pode-se observar que as áreas com maior insolação estão ao redor do equador, sendo as regiões desérticas as com as melhores médias.

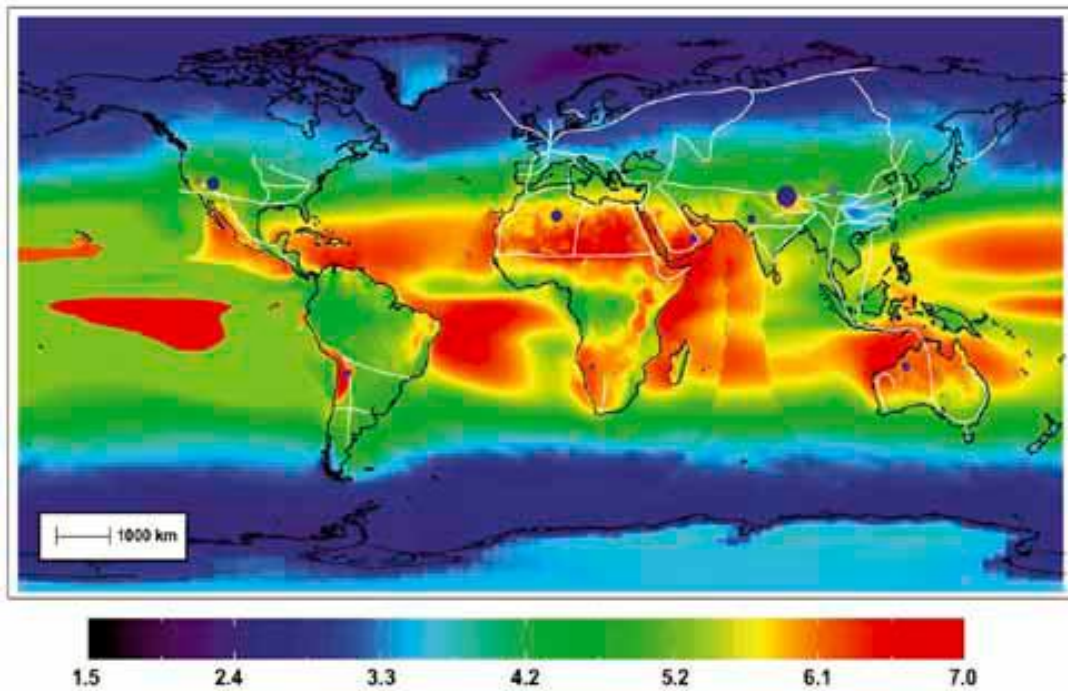


Figura 3.1 – Irradiação média anual em plano horizontal, kWh/m<sup>2</sup>.dia (ABINEE, 2012)

### 3.1. Potencial Brasileiro

O Brasil possui uma posição relativamente privilegiada no cenário mundial, pois de uma maneira geral todo o país tem boas médias de irradiação solar, com os melhores números na região nordeste e centro-oeste. Um mapa mais detalhado da irradiação solar no Brasil pode ser consultado no “Atlas Brasileiro de Energia Solar” publicado pelo INPE em 2006 como parte do projeto SWERA, que teve o objetivo de facilitar o acesso a dados para projetos futuros de energias renováveis no país.

Abaixo na figura 3.1.1 pode-se ver a radiação solar global do Brasil (média anual dada em kWh/m<sup>2</sup> / dia):

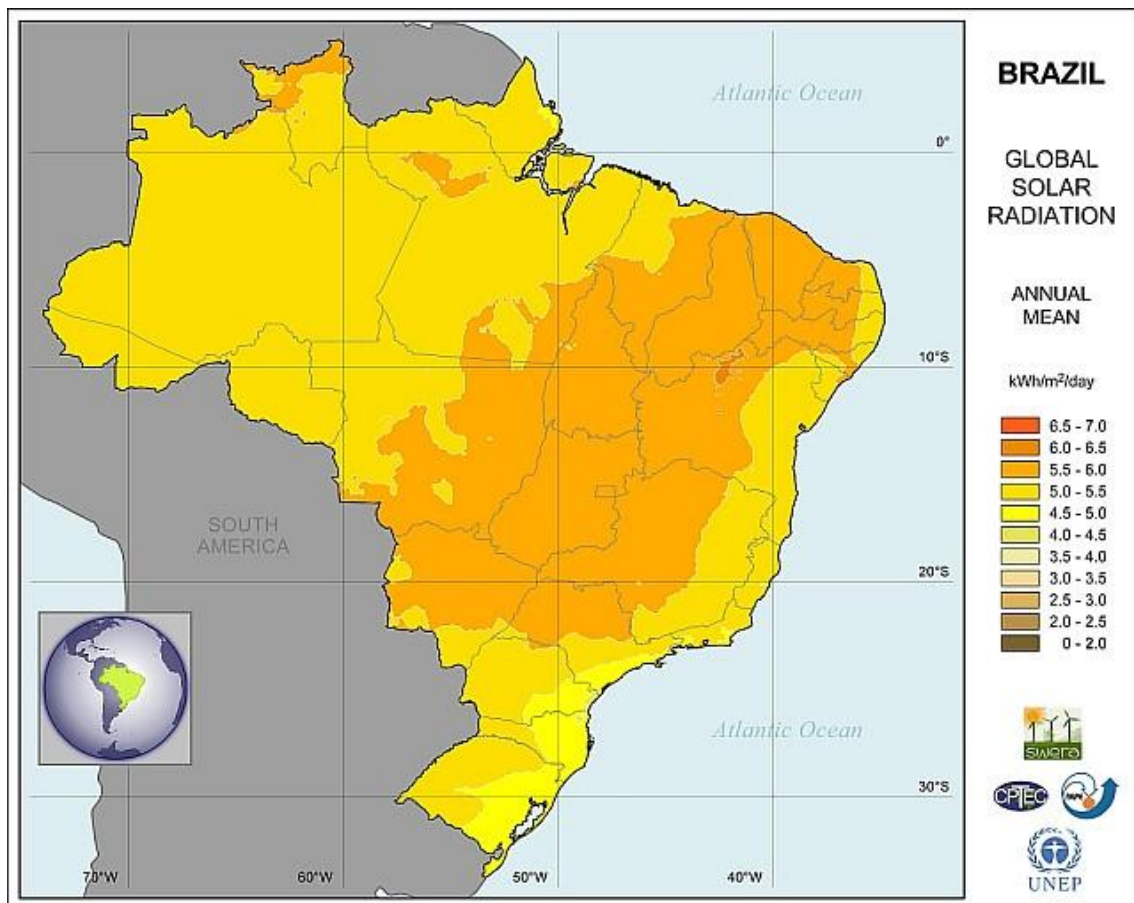


Figura 3.2 – Irradiação solar média anual no Brasil (SWERA, INPE)

Analisando os dados apresentados na figura 3.1.1, vemos que a irradiação no território brasileiro varia em torno de 4,5 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia (SWERA – INPE, 2006). A um primeiro momento pode não parecer muito visto que em regiões de deserto esse valor pode atingir de 7 a 8 kWh/m<sup>2</sup>/dia, porém quando comparamos com outras regiões do mundo como por exemplo a Alemanha, que atualmente é o país que mais investe na tecnologia fotovoltaica, possui a maior capacidade de energia instalada e que vê a tecnologia como uma alternativa viável a geração de energia, tem uma irradiação máxima de apenas 3,4 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

#### 4. Futuro da Energia Solar Fotovoltaica

As células solares fotovoltaicas, construídas a partir de silício são eficientes, mas extremamente caras.

Uma das opções mais promissoras que já vem sendo estudadas e desenvolvidas a mais de 20 anos são as células solares orgânicas, ou células solares de Gratzel, que usam corantes sintéticos. Seu funcionamento tem base na fotossíntese encontrada na natureza, e imita a maneira como as plantas retiram sua energia do Sol. Tecnicamente elas são conhecidas como células solares DSC (“Dye-sensitized Solar Cell”, ou célula solar sensibilizada por corante).

Seu custo de produção pode ser muito mais barato do que as células solares de silício pois podem ser fabricadas por impressão, além de poderem ser construídas sobre superfícies flexíveis, adaptando-se melhor à arquitetura das construções e aumentando sua gama de aplicações.

Uma pesquisa recente resolveu um dos problemas que mais dificultavam a introdução comercial deste tipo de célula fotovoltaica, os corantes usados nas células orgânicas eram até então essencialmente líquidos e muito corrosivos, que acabavam por vazarem e destruir a célula solar. Porém essa nova pesquisa publicada ainda em 2012 por pesquisadores da Universidade Northwestern, nos Estados Unidos, substituiu o eletrólito líquido por um elemento de estado sólido composto por césio, estanho e iodo.

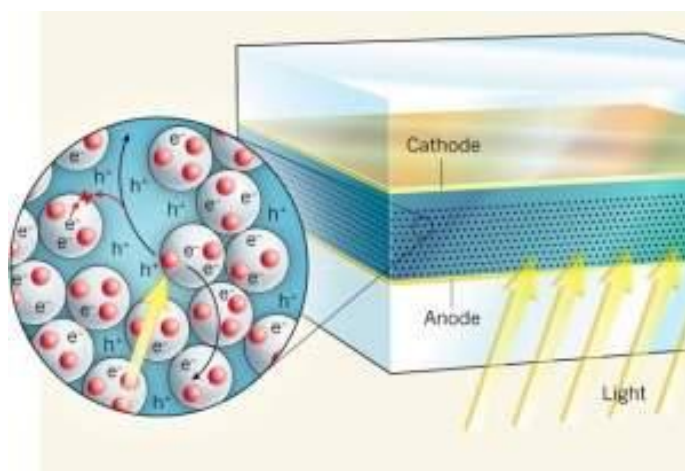


Figura 4.1 – Célula Solar Orgânica (Inovação Tecnológica, 2012)

O protótipo mostrou uma eficiência acima da média para as células solares orgânicas: 10,2%. A melhor célula solar de Gratzel feita até agora, tinha uma eficiência de 12%, enquanto as células solares de silício encontradas no mercado alcançam 16%. A melhora da eficiência foi conseguida porque o novo eletrólito sólido desenvolvido é um absorvedor de luz, o que não acontecia com eletrólito líquido original (Inovação Tecnológica, 2012).

## 5. Dimensionamento de um Sistema Solar Fotovoltaico

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico é relativo e depende muito do objetivo que se deseja atingir.

Primeiramente, existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos:

**Sistemas isolados:** onde a instalação elétrica local não está interligada a rede. Nesse caso, o sistema deverá ser dimensionado para suprir 100% das necessidades energéticas do local, ser capaz de fornecer toda a energia utilizada no período noturno quando não há radiação solar e ainda suportar períodos de baixa radiação solar, como no caso de dias nublados ou chuvosos. Para tanto, esse sistema isolado precisa fazer o uso de baterias para armazenar a energia adicional; sendo esse o modelo mais utilizado em locais onde não se tem acesso à rede de distribuição de energia, como áreas rurais afastadas e locais de difícil acesso, ou se deseje ficar totalmente independente do fornecimento externo de energia.

**Sistema interligado à rede:** Nesse modelo, a instalação do local permanece conectada à rede da concessionária, e um tipo de inversor especial controla a entrada da energia da rede externa no caso do sistema fotovoltaico não estar provendo toda a energia consumida no momento; e a saída ou fornecimento da energia excedente para a rede da concessionária, no caso do sistema fotovoltaico estar produzindo mais energia do que o consumido. Esse modelo é o preferido quando se tem disponível na região da instalação uma rede de distribuição.

Neste trabalho de conclusão de curso, será utilizado e analisado somente o modelo de sistema interligado à rede, visto que o trabalho tem por objetivo o estudo da viabilidade do sistema em aplicações urbanas residenciais, onde se tem fácil acesso a rede de distribuição de energia elétrica

### 5.1. Sistema Fotovoltaico Interligado a Rede

Os sistemas fotovoltaicos interligados a rede da concessionária de energia local, também conhecidos internacionalmente como “grid-tie”, já são uma realidade e vem se popularizando em vários países da Europa, Japão e Estados Unidos. No Brasil a popularização da tecnologia ainda carece de incentivos e investimentos que tornem a implementação de projetos desse tipo viáveis, porém muito

recentemente no ano de 2012, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) definiu e regulamentou uma política de compensação de energia para micro e pequenos produtores, que permite por exemplo que uma residência ou empreendimento gere sua própria energia e pague apenas uma taxa mínima pelo acesso a rede de distribuição elétrica.

Na figura 5.1.1 abaixo temos representado um sistema conectado à rede com seus componentes mais importantes:

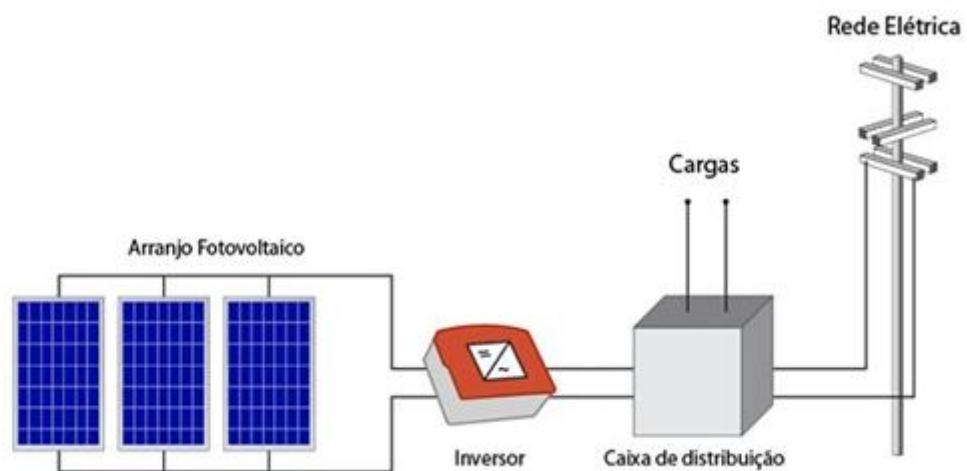


Figura 5.1 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

A instalação de um sistema fotovoltaico conectado a rede é bastante simples, sendo composta basicamente pelos painéis do arranjo fotovoltaico, um ou mais inversores de frequência e medidor de energia. Outros acessórios como suporte de fixação dos painéis e cabos para a interligação entre painéis e inversor também são necessários, porém financeiramente representam uma parcela reduzida do custo do projeto. Atualmente no Brasil não existem fornecedores de painéis fotovoltaicos ou inversores do tipo grid-tie, o que contribui fortemente para o elevado custo do sistema no país.

A seguir veremos como dimensionar cada um dos componentes de sistema fotovoltaico padrão.

## 5.2. Avaliação do Recurso Solar

Primeiramente, antes do dimensionamento de qualquer equipamento da instalação solar, deve-se conhecer o potencial de radiação solar da região geográfica onde se irá realizar a instalação. No caso deste trabalho de conclusão de curso, iremos tomar como exemplo a região da cidade de Sorocaba, no estado de São Paulo, localizada a cerca de 90km da capital.



Figura 5.2 – Mapa da região da cidade de Sorocaba (Google Maps)

Para determinar com precisão a irradiância solar de um local específico do mapa, é necessário realizar medições na superfície terrestre. Para tanto é utilizado um instrumento chamado piranômetro, que é capaz de medir as irradiâncias direta, que são os raios solares que incidem perpendicularmente à superfície, e difusa, que é a irradiação refletida ou refratada por elementos atmosféricos como nuvens, neblina, poluição e etc.



Figura 5.3 – Piranômetro do tipo preto e branco (Atlas Solarimétrico do Brasil, CEPEL)

Hoje já existe uma grande base de dados de medição da irradiância solar realizado no Brasil, como por exemplo a disponível no Atlas Solarimétrico do Brasil, publicado pela CRESESB no ano 2000.

Para qualquer instalação fotovoltaica é muito importante utilizar os dados de irradiação solar mais próximo do local da instalação. No caso deste trabalho, os dados medidos mais próximos estão situados na região da cidade de Itapetininga, localizada a 58km de Sorocaba. Os dados podem ser obtidos a partir do banco de dados Sundata (CEPEL, CRESESB) informando-se apenas os dados de coordenada geográfica do local desejado. Ou ainda pode-se obter os dados a partir da versão impressa do Atlas Solarimétrico.

	Município	Itapetininga/SP
	Latitude [°]	23,59°S
	Longitude [°]	48,05°O
	Distância do local original [km]	58,2
Radiação diária média [kwh/m2.dia] Plano Horizontal	Jan	5,44
	Fev	5,11
	Mar	5,11
	Abr	4,44
	Mai	3,94
	Jun	3,31
	Jul	3,75
	Ago	4,22
	Set	4,36
	Out	5,06
	Nov	5,86
	Dez	6
	Média	4,72
Delta	2,69	

Tabela 5.1 – Radiação Solar Diária Média Mensal na cidade de Sorocaba

Também são fornecidos os valores de radiação diária média mensal para um plano inclinado em relação a horizontal. A inclinação necessária para a obtenção da maior média anual e do maior mínimo mensal de radiação são automaticamente calculados e apresentados:

	Ângulo	Plano Horizontal	Ângulo igual a latitude	Maior média anual	Maior mínimo mensal
	Inclinação	0° N	24° N	22° N	33° N
Radiação diária média mensal [kwh/m <sup>2</sup> .dia]	Jan	5,44	4,91	4,97	<b>4,57</b>
	Fev	5,11	4,87	4,91	4,63
	Mar	5,11	5,27	5,28	5,15
	Abr	4,44	5,07	5,04	5,13
	Mai	3,94	4,98	4,91	<b>5,19</b>
	Jun	<b>3,31</b>	<b>4,34</b>	<b>4,28</b>	4,58
	Jul	3,75	4,87	4,8	5,13
	Ago	4,22	5,02	4,98	5,15
	Set	4,36	4,64	4,64	4,6
	Out	5,06	4,93	4,97	4,73
	Nov	5,86	<b>5,34</b>	<b>5,41</b>	4,99
	Dez	<b>6</b>	5,31	5,39	4,9
	Média	<b>4,72</b>	<b>4,96</b>	<b>4,97</b>	<b>4,9</b>
	Delta	<b>2,69</b>	<b>1</b>	<b>1,13</b>	<b>0,62</b>

Tabela 5.2 – Radiação Diária Média Mensal em várias inclinações no plano

No caso de um sistema solar fotovoltaico, o melhor é optar pela angulação que forneça a maior média diária, pois isso garantirá a maior produção de energia ao longo do ano. No caso de um sistema de aquecimento solar de água por exemplo, o mais indicado é optar pelo ângulo que garanta o maior mínimo mensal, pois há um ganho significativo de energia nos meses de inverno, justamente onde o aquecimento da água se faz mais necessário.

No nosso caso, utilizaremos a inclinação com ângulo igual a 22°, e que fornecerá cerca de 4,97 kWh/m<sup>2</sup>.dia de energia.

É comum vermos as especificações de módulos fotovoltaicos serem baseadas pelo número de horas de Sol Pleno (SP), uma grandeza que pode ser definida como:

**Sol Pleno:** é o número de horas em que a radiação solar variável ao longo do dia fornece o equivalente a 1 kW/m<sup>2</sup> (1000 W/m<sup>2</sup>).

No nosso caso, na cidade de Sorocaba teremos:

$$SP = \frac{4,97 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}}{1 \text{ kW/m}^2}$$

$$SP = 4,97 \text{ h/dia}$$

Ou seja, nessa localidade geográfica o sol irá despejar cerca de 5 horas de radiação equivalente e 1000 W/m<sup>2</sup>.

### 5.3. Arranjo Fotovoltaico

Para o dimensionamento correto do conjunto de módulos fotovoltaicos, é necessário inicialmente conhecer os parâmetros construtivos do módulo utilizado. Por exemplo, a figura 5.3.1 abaixo mostra os dados de construção do módulo modelo BYD 240P6-30 do fabricante BYD Solar.

Devemos nos atentar que os valores apresentados na figura 5.3.1 são medidos em condições controladas de teste STC (Standard Test Conditions), porém, nas condições de uma instalação real a temperatura do módulo frequentemente ultrapassa os 25° C.

<b>Modelo: BYD 240P6-30</b>		
<b>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS</b>		
Potência máxima (Pmax) em condições de teste padrão (STC)	Wp	240
Tolerância de potência	%	3
Eficiência do módulo (ηm)	%	17,3
Tensão de máxima potência (Vmpp)	V	29,55
Corrente de máxima potência (Impp)	A	8,12
Tensão em circuito aberto (Voc)	V	37,54
Corrente de curto-circuito (Isc)	A	8,9
Temperatura Operacional	°C	-40 a +85
Condições de teste padrão (STC): irradiação de 1000 W/m <sup>2</sup> ; temperatura do módulo de 25°; AM=1,5		

Figura 5.4 – Características Elétricas do módulo BYD 240W

Para cada 1° C de acréscimo estima-se que o módulo sofra uma perda de cerca de 0,4% de seu rendimento total (MAU e JAHN, 2009).

Assumindo um valor médio de 45 °C, teremos uma queda de rendimento do módulo de cerca de 8%.

Outro fator determinante no rendimento de um módulo fotovoltaico é a limpeza da superfície do vidro protetor. A deposição de partículas de sujeira provenientes de emissões de escapamentos de automóveis, indústrias, queimadas e outros fatores comuns à região urbana, pode reduzir muito o desempenho do conjunto de módulos, variando de 2% a 25% (KIMBER, MITCHELL, et al., 2006). A limpeza dos módulos se feita com alguma regularidade, principalmente em épocas de pouca chuva, é uma solução simples que pode contribuir para manter a perda por acúmulo de partículas próximo ao mínimo de 2%.

Outra fonte de perda de rendimento inevitável é a degradação natural das células fotovoltaicas ao longo do tempo. Estudos indicam uma redução média de 0,8% por ano para células de silício cristalino (JORDAN e KURTZ, 2011).

Com o conhecimento das perdas que impactam significativamente a arranjo fotovoltaico e os dados do fabricante, podemos estimar um fator de correção para o dimensionamento do conjunto:

*perdas por temperatura das células: 0,4% de perda de eficiência para cada 1°C de aumento de temperatura do módulo*

*para +20 °C acima dos 25 °C definido na condição padrão STC: 0,4% x 20°C = 8% de perdas no módulo*

*perdas por deposição de sujeira nos módulos: 2% por módulo*

*PTC (perdas totais no módulo): 8% + 2% = 10%*

Podemos então aplicar um fator de redução de 0,1 no dimensionamento do arranjo fotovoltaico.

## 5.4. Inversor de Frequência

O dimensionamento adequado do inversor está fortemente ligado a capacidade de geração do conjunto fotovoltaico. De acordo com alguns autores, dimensionar o inversor com uma capacidade inferior ao conjunto de geração normalmente significa um melhor funcionamento geral do sistema, pois na prática um módulo gerador fotovoltaico dificilmente entregará sua potência nominal máxima, hora por não ter disponível em seu plano o nível de irradiância solar necessária especificada pelas condições STC ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ), hora por razão das perdas causadas pela temperatura elevada das células ou o acúmulo de sujeira em sua superfície. Sendo assim, o limite máximo suportado pelo inversor é pouco utilizado, e vários estudos com o objetivo de definir o quanto um inversor pode ser dimensionado abaixo da capacidade do gerador já foram realizados. O FDI (Fator de Dimensionamento do Inversor) varia com a região geográfica da instalação; um estudo prático realizada na cidade de São Paulo mostra a influência do valor do FDI na produção final de energia (MACÊDO, 2007).

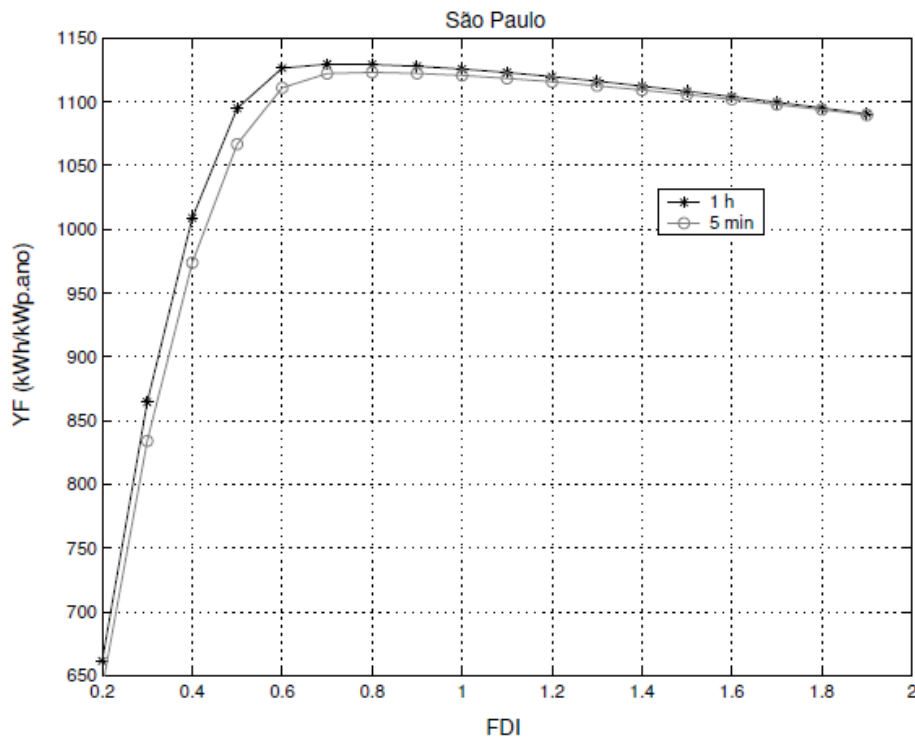


Figura 5.5 – Produtividade de um sistema em função do FDI (MACÊDO, 2007)

Note-se que para valores de FDI  $\geq 0,6$  não há uma redução significativa da energia produzida, enquanto que à medida que sobre dimensionamos o inversor com FDI  $> 1$ , ou seja, com uma capacidade maior que a geração, começa a haver uma redução significativa da energia produzida.

Porém, sendo este estudo do ano de 2007 e o fato de que com o rápido avanço da tecnologia a diferença entre a potência nominal dos equipamentos e a potência real entregue vem a cada dia diminuindo com ao aumento da eficiência, recomenda-se que a potência do inversor esteja próxima da potência nominal do conjunto gerador. Um valor de FDI muito baixo poderia expor o inversor a um período de sobrecarga muito elevado, levando a um encurtamento da vida útil do equipamento ou até mesmo na queima do equipamento em casos mais extremos.

Com base nesses dados, será adotado nesse trabalho um FDI = 0,8.

Para dimensionar, tomemos como exemplo o inversor da figura 5.4.1 do fabricante SMA:

<b>Inversor SMA SB 1200</b>	<b>ENTRADA (DC)</b>	
	<b>Potência Máxima</b>	<b>1320 W</b>
	<b>Tensão de entrada máxima</b>	400 V
	<b>Ponto de máxima potência</b>	100 V – 320 V / 120 V
	<b>Tensão de entrada mínima</b>	100 V
	<b>Corrente de entrada máxima</b>	12.6 A
	<b>SAÍDA (AC)</b>	
	<b>Potência de saída máxima</b>	<b>1200 W</b>
	<b>Tensão AC nominal / faixa de operação</b>	220 V, 230 V, 240 V / 180 V – 265 V
	<b>Frequência de saída</b>	50 Hz, 60 Hz / + ou -4.5 Hz
	<b>Corrente máxima de saída</b>	6.1 A
<b>Eficiência máxima</b>	92.1 %	

Tabela 5.3 – Especificações de um Inversor de 1.2 kW

Sendo a potência máxima do inversor  $P_{max} = 1300 \text{ W}$ , podemos dimensionar a geração fotovoltaica máxima suportada considerando o fator de dimensionamento do inversor como  $FDI = 0,8$ :

$$P_{max. geração} = \frac{P_{max.}}{FDI}$$

$$P_{max. geração} = \frac{1320 \text{ W}}{0,8}$$

$$P_{max. geração} = 1650 \text{ W}$$

Ou seja, um inversor de frequência de potência nominal de pico igual a 1320 W poderá atender um conjunto de geração de módulos fotovoltaicos com até 1650W de potência de pico nominal.

Um inversor conectado à rede funciona da seguinte maneira:

- 1 – Toda a energia elétrica produzida pelo arranjo de módulos fotovoltaicos é entregue diretamente à rede da concessionária de energia local. Antes de enviar a energia à rede, o inversor ajusta a saída CA na mesma tensão e frequência de operação da rede, fornecendo uma onda de forma senoidal com baixo teor de harmônicas.
- 2 – A residência consome sua energia apenas a partir da rede elétrica da concessionária, cabendo ao medidor de energia da concessionária realizar a compensação do que foi produzido/consumido.
- 3 – Em caso de falta de energia na rede da concessionária, o inversor desconecta-se automaticamente, para que nenhuma energia seja enviada, evitando assim acidentes em caso de manutenção.

## 5.5. Medidor Inteligente

O local precisará possuir um medidor de energia capaz de registrar o histórico de “compra e venda de energia” de/para a concessionária local, o seja, deverá poder fazer a compensação da energia consumida da rede pela energia fornecida à rede. Atualmente os medidores convencionais em uso no Brasil não são possuem esse recurso, porém no dia 17 de abril de 2012 a ANEEL publicou a

resolução normativa nº 482, que estabelece um prazo máximo de 240 dias para que todas as distribuidoras de energia do país realizem a troca dos medidores convencionais pelos “inteligentes” e também que, a partir da data da publicação da resolução se o consumidor solicitar, a distribuidora deverá fornecer um medidor homologado segundo as regras estabelecidas no PRODIST.



Figura 5.6 - Medidor Ecil MD-2400 (Ecil Energia)

## 6. Aplicação em um condomínio de apartamentos residenciais

A proposta deste trabalho é produzir 100% da energia elétrica consumida pelas cargas existentes na área comum de um condomínio de prédios residenciais.

O residencial proposto é composto de 7 blocos prediais de 4 andares com 4 apartamentos por andar. Na figura 6.1 pode-se observar uma perspectiva panorâmica do condomínio, onde se vê a existência de uma grande área de telhados livres de sombreamento, ideal para a instalação de módulos fotovoltaicos.



Figura 6.1 – Vista artística panorâmica do condomínio

Segundo dados fornecidos pela construtora, o empreendimento possui as seguintes medidas por queda lateral de telhado:

Comprimento total: 19,8 m

Largura: 5,9 m

Altura: 2 m

Inclinação: 20 °

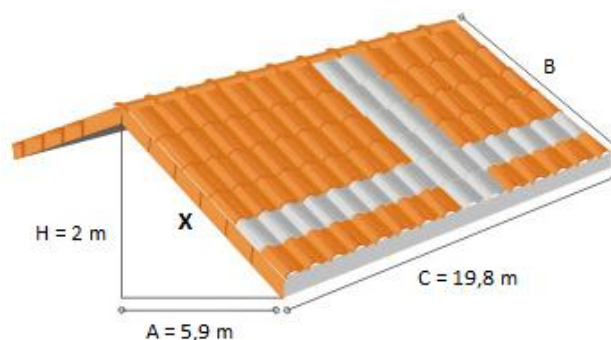


Figura 6.2 – Dimensões do telhado

$$\text{Logo: } x^2 = 2^2 + 5,9^2 \rightarrow x = 6,23 \text{ m}$$

Então a área disponível para uso por queda lateral será de:

$$6.1. \text{Área} = 19,8\text{m} \times 6,23\text{m} = 123,35 \text{ m}^2$$

De posse dos dados de consumo de energia elétrica da área comum do condomínio, disponibilizado pela administração, podemos estimar a quantidade de energia necessária a ser produzida.

A partir dos valores médios de consumo de cada bloco podemos dimensionar o arranjo fotovoltaico e inversor necessários para suprir o consumo geral do condomínio.

<b>Consumo da Área Comum (kWh/mês)</b>	<b>Bloco 1</b>	<b>Bloco 2</b>	<b>Bloco 3</b>	<b>Bloco 4</b>	<b>Bloco 5</b>	<b>Bloco 6</b>	<b>Bloco 7</b>
<b>Janeiro</b>	637	439	119	241	318	677	390
<b>Fevereiro</b>	628	415	101	237	311	659	381
<b>Março</b>	665	428	113	254	304	661	378
<b>Abril</b>	698	454	111	271	327	698	405
<b>Mai</b>	735	467	115	266	319	717	411
<b>Junho</b>	775	488	106	272	324	723	403
<b>Julho</b>	726	479	108	262	310	662	403
<b>Agosto</b>	1189	501	131	293	366	685	343
<b>Setembro</b>	1364	320	454	112	342	633	262
<b>Outubro</b>	1008	455	327	147	301	598	288
<b>Novembro</b>							
<b>Dezembro</b>							
<b>Média</b>	<b>843</b>	<b>445</b>	<b>169</b>	<b>236</b>	<b>322</b>	<b>671</b>	<b>366</b>

Tabela 6.1 – Consumo de Energia da Área Comum do Condomínio

## 6.2. Cargas e Perfil de Utilização

As cargas elétricas da área externa do condomínio constituem-se basicamente de lâmpadas para a iluminação externa noturna. Vale ressaltar que esse é um

cenário que se encaixa muito bem na nova regulamentação de compensação energética recentemente aprovada pela ANEEL, já que quase todo o consumo se dá durante o período noturno onde não se produz energia solar. Desse modo, durante o dia produz-se a energia que é integralmente “vendida” para a rede da concessionária e durante a noite a energia é “comprada” de volta, fazendo assim a compensação energética.

### 6.3. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Conforme já foi mostrado anteriormente, o consumo médio de cada bloco é:

<b>Consumo da Área Comum (kWh/mês)</b>	<b>Bloco 1</b>	<b>Bloco 2</b>	<b>Bloco 3</b>	<b>Bloco 4</b>	<b>Bloco 5</b>	<b>Bloco 6</b>	<b>Bloco 7</b>
Média	<b>843</b>	<b>445</b>	<b>169</b>	<b>236</b>	<b>322</b>	<b>671</b>	<b>366</b>

Tabela 6.2 – Média de Consumo de Energia por Bloco

<b>Consumo da Área Comum (kWh/mês)</b>	<b>Bloco 1</b>	<b>Bloco 2</b>	<b>Bloco 3</b>	<b>Bloco 4</b>	<b>Bloco 5</b>	<b>Bloco 6</b>	<b>Bloco 7</b>
Média	<b>843</b>	<b>445</b>	<b>169</b>	<b>236</b>	<b>322</b>	<b>671</b>	<b>366</b>
Soma das médias	<b>3051</b>						
Soma das médias / 4				<b>763</b>	<b>763</b>	<b>763</b>	<b>763</b>

Tabela 6.3 – Soma das médias de consumo de energia dividida nos quatro prédios com telhado voltado para o norte

Ou seja, o arranjo de módulos fotovoltaicos deverá ser capaz de suprir o total das somas de energia média consumida de todos os blocos. Convenientemente, quatro dos blocos residenciais tem um de seus telhados voltados para a direção norte, ideal para o posicionamento dos módulos fotovoltaicos, de modo que iremos restringir a esses quatro prédios toda a geração de energia.

Sendo assim, somaremos as médias dos sete blocos e dividiremos por quatro, chegamos ao valor final de energia a ser produzido por cada um dos quatro arranjos fotovoltaicos a serem instalados nos blocos 4, 5, 6 e 7.

#### 6.3.1. INVERSOR

Como definido anteriormente no capítulo 5, utilizaremos neste trabalho um Fator de Dimensionamento do inversor  $FDI = 0,8$ , ou seja, a potência

máxima do inversor será ajustada para 80% da capacidade de produção do conjunto fotovoltaico.

Primeiramente, devemos calcular a potência que será entregue na saída do inversor, que deverá ser a mesma do consumo de energia diário, dividida pelas quantidades de horas de radiação solar nas condições STC, com 1000 W/m<sup>2</sup>:

Horas de Radiação (h) = 5

Mês (dia) = 30

Cálculo de potência média a ser gerada por dia:

$$\text{Potência Média Diária} = \frac{763 \text{ kWh}}{30} = 25,4 \text{ kWh/dia}$$

Energia a ser entregue na saída do inversor num período de geração de 5 horas:

$$\text{Potência na saída do inversor} = \frac{25,4 \text{ kWh}}{5 \text{ h}} = 5,08 \text{ kW ou } 5.008 \text{ W}$$

Sendo a eficiência do inversor utilizado igual a 97%, a potência entregue na entrada do inversor deverá ser:

$$\begin{aligned} \text{Potência Máxima Entregue na Entrada do inversor} &= \frac{5.008 \text{ W}}{0,97} \\ &= 5.162 \text{ W} \end{aligned}$$

Para que possamos calcular a potência nominal de entrada do inversor, é preciso considerar a geração máxima teórica do conjunto fotovoltaico, ou seja, aplicar o fator de perda PTM definido anteriormente na quantidade de energia máxima que deverá ser entregue ao inversor:

$$\text{Geração Máxima Teórica} = \frac{5.162 \text{ W}}{1 - (0,1)} = 5.735 \text{ W}$$

Ajustando a potência máxima de entrada do inversor para FDI = 0,8 temos:

$$\begin{aligned} \text{Potência Máxima Nominal na Entrada do inversor} &= 5.735 \times 0,8 \\ &= 4.588 \text{ W} \end{aligned}$$

Com esses dados, o inversor disponível no mercado que melhor se adequou as necessidades deste trabalho foi o da fabricante Eltek Valere mostrado na figura 6.2.1.1 abaixo:



Figura 6.3 – Inversor de Frequência Eltek Valere 4.4kW

Eltek Valere THEIA HE-t 4.4kW	<b>ENTRADA (DC)</b>	
	<b>Potência Máxima</b>	<b>4.600 W</b>
	<b>Potência Máxima Recomendada do Gerador Fotovoltaico</b>	5.750 W
	<b>Tensão de entrada máxima</b>	600 V
	<b>Faixa do Ponto de Máxima Potência</b>	230 a 480 V
	<b>Corrente de entrada máxima</b>	21 A
	<b>SAÍDA (AC)</b>	
	<b>Potência de saída máxima</b>	<b>4.400 W</b>
	<b>Tensão AC nominal / faixa de operação</b>	220V / 184 V – 276 V
	<b>Frequência de saída</b>	50 Hz, 60 Hz / + ou -5 Hz
	<b>Corrente máxima de saída</b>	20 A
	<b>Eficiência máxima</b>	97,3%

Tabela 6.4 – Especificações do Inversor Eltek Valere 4.4kW

O inversor é uma peça central no sistema, e irá receber e distribuir a energia gerada e consumida. Deve-se atentar para uma correta ligação de seus terminais de conexão. A figura 6.2.1.2 mostra as conexões de entrada e saída do inversor Eltek de 4.4kW:

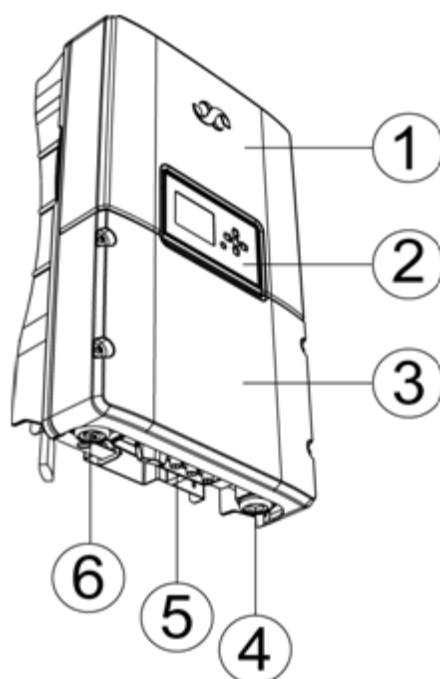


Figura 6.4 – Terminais de conexão do inversor (Eltek Valere)

Onde:

- 1 – Capa de proteção superior
- 2 – Display informativo
- 3 – Capa de proteção dos terminais de conexão
- 4 – Saída AC, monofásica ou bifásica, para a rede elétrica da concessionária
- 5 – Entrada DC, para conexão do conjunto de módulo FV
- 6 – Conexão de rede de dados

### 6.3.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para o dimensionamento do conjunto, utilizaremos o módulo de 240W do fabricante BYD Solar, já mencionado anteriormente e, aplicaremos o fator de redução PTM exemplificado no capítulo 5.

O conjunto de módulos deverá produzir toda a energia a ser entregue na entrada do inversor.

Potência Máxima Entregue na Entrada do inversor (W) = 5.162

Potência do Módulo (W) = 240

Tempo de Insolação equivalente a 1000 W/m<sup>2</sup>, Ts (horas) = 5

Fator de redução da eficiência do módulo, PTM = 10%

A quantidade de módulos necessários para gerar a energia requerida na entrada do inversor, considerando a perda de eficiência dos módulos PTM, será:

$$n^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{5.162 \text{ W}}{240 \text{ W} \times (1 - 0,1)} = 23,9 \text{ módulos} = 24 \text{ módulos}$$

### 6.3.3. CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA

Para determinar qual esquema de ligação série/paralelo dos 24 módulos definidos no capítulo anterior deve-se utilizar, temos que nos basear nos

seguintes parâmetros construtivos do inversor e módulo já apresentados anteriormente:

Ponto de Máxima Potência do Inversor: 230V a 480V

Tensão de Máxima Potência do Módulo: 29,55V

Corrente de Entrada Máxima do Inversor: 21A

Corrente de Máxima Potência do Módulo: 8,12A

A faixa de tensão de entrada, recebida pelo inversor dos módulos ligados em série, deve-se situar sempre entre 230V e 480V para que o inversor possa produzir sua eficiência máxima. Por outro lado, o número de módulos ligados em paralelo não deve ultrapassar a corrente de entrada máxima suportada pelo inversor.

Levando em conta esses parâmetros, podemos utilizar a seguinte configuração:

2 conjuntos de 12 módulos ligados em série, resultando em  $12 \times 29,55V = 354,6V$  de tensão máxima na entrada do inversor. Em seguida, ligação em paralelo dos dois conjuntos, resultando numa corrente de  $2 \times 8,12A = 16,24A$  máxima na entrada do inversor.

Com isso temos o esquema de configuração representado na figura 6.2.3.1:

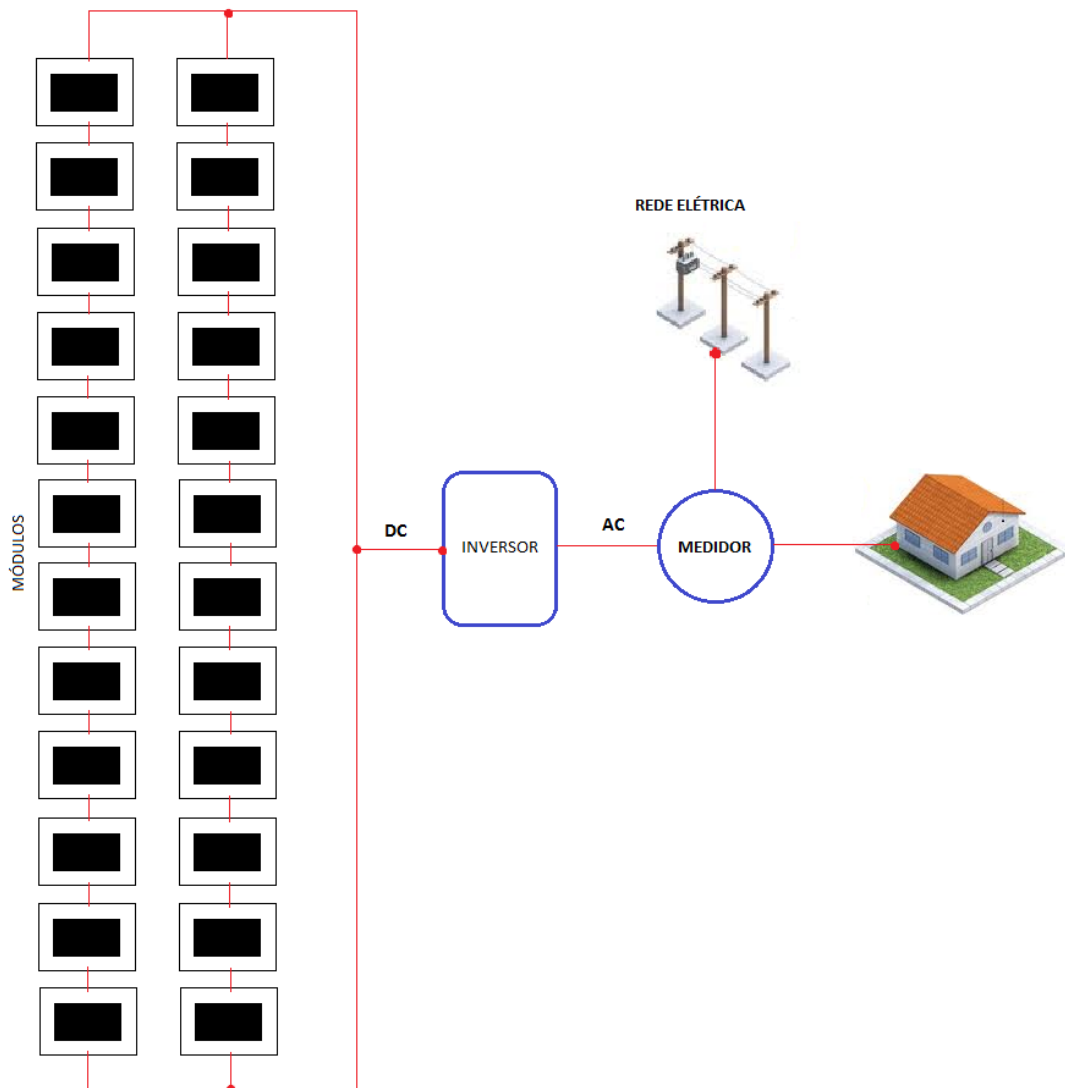


Figura 6.5 – Configuração elétrica dos componentes do sistema fotovoltaico

Como modo de otimizar ao máximo a geração, deve-se procurar elevar a tensão entregue ao inversor próximo do máximo suportado por ele, pois em dias de baixa irradiação solar, pode facilmente cair abaixo do limite mínimo para a manutenção de uma eficiência elevado do inversor.

#### 6.3.4. INSTALAÇÃO FÍSICA

**POSICIONAMENTO E INCLINAÇÃO:** Para a colocação dos módulos no telhado, primeiramente deve-se definir a orientação e ângulo. Como regra básica, instalações situadas no hemisfério sul do planeta devem ter orientação voltada para o norte geográfico. Quanto a inclinação dos

módulos, como dito anteriormente no capítulo 5.2, para uma instalação fotovoltaica conectada e rede, a melhor escolha de inclinação é aquela que dá a melhor média de produção energética no ano. Sendo assim os painéis deverão ser posicionados como representado na figura 6.2.4.1:

Orientação: Norte geográfico

Inclinação:  $22^\circ$  N em relação ao plano horizontal

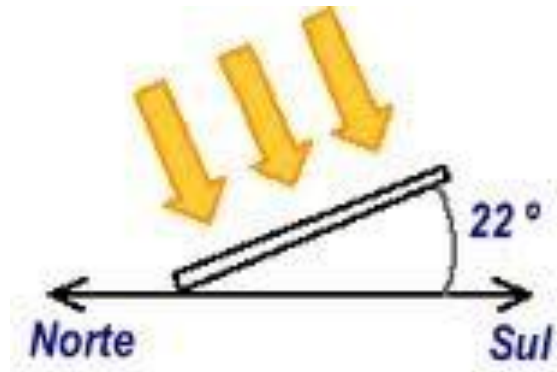


Figura 6.6 – Inclinação do módulo fotovoltaico em relação ao plano horizontal

No caso deste trabalho como o telhado do edifício já possui uma inclinação de  $20^\circ$  em relação a horizontal, e uma das faces do telhado já está voltada para o norte, será preciso apenas que o suporte do módulo incline  $2^\circ$ .

**ÁREA OCUPADA:** Para determinar a área de telhado mínima necessária para a instalação dos módulos, temos que conhecer as dimensões físicas dos módulos. Na figura 6.2.4.2 abaixo podemos ver as dimensões do módulo escolhido neste trabalho:

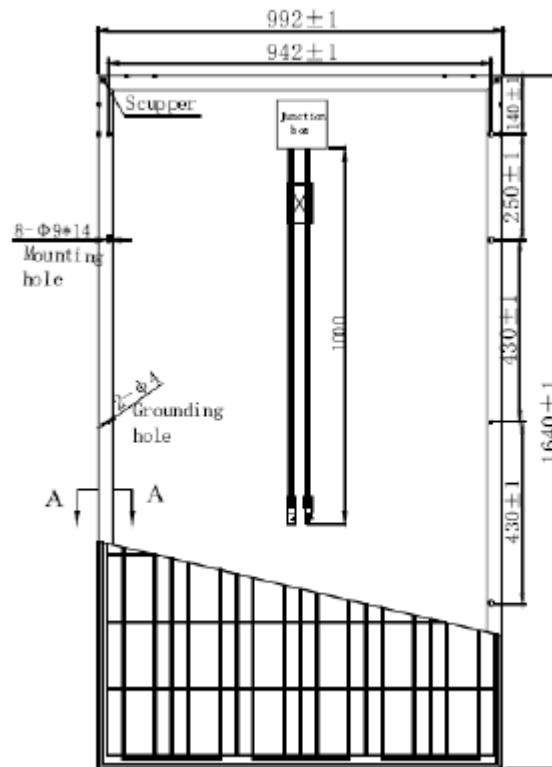


Figura 6.7 – Dimensões do módulo fotovoltaico de 240W (BYD)

Comprimento: 1,64 m

Largura: 0,992 m

Área: 1,64 m x 0,992 m = 1,63 m<sup>2</sup>

Área Total: nº de módulos x área do módulo = 24 x 1,63 = 39,12 m<sup>2</sup> de telhado

Sendo a área de telhado disponível no prédio igual a 123,35 m<sup>2</sup>, conforme os dados fornecidos pela administradora do empreendimento, a área é mais do que o suficiente para a necessidade dos 24 módulos a serem instalados em cada edifício.

## 7. Análise Econômica

Esse capítulo visa mostrar o custo atual de um projeto de sistema fotovoltaico residencial numa área urbana, e verificar sua competitividade em relação ao custo do kWh cobrado pelas concessionárias locais.

Dados do Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), mostram que a capacidade de energia solar fotovoltaica instalada no mundo vem crescendo rapidamente nos últimos anos, com um aumento de 74% apenas em relação ao último ano de 2011.

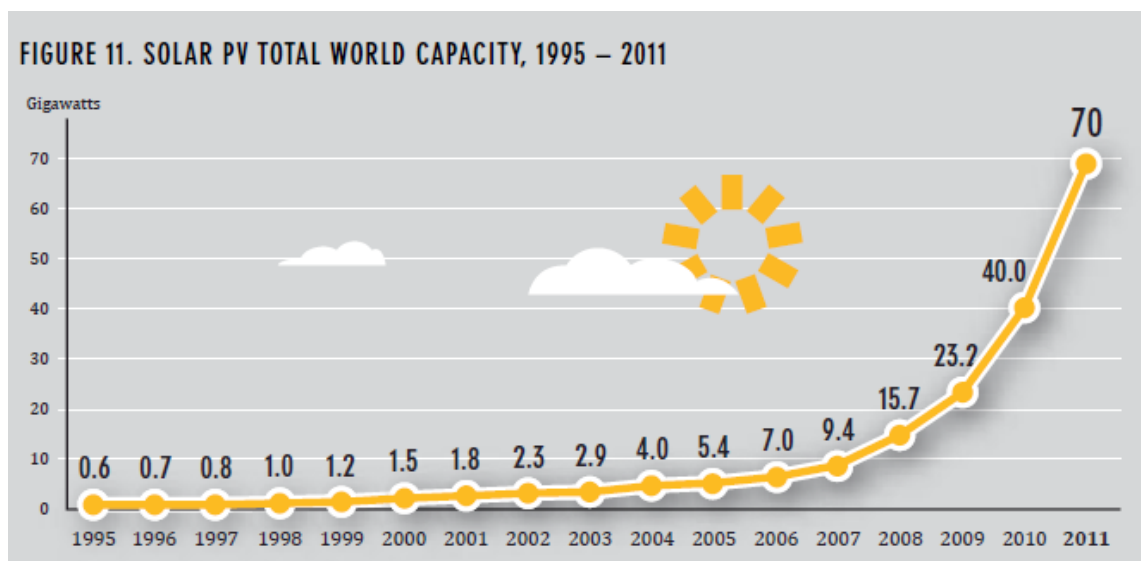


Figura 7.1 – Crescimento da capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica no período de 1995-2011 (REN21)

Com o rápido aumento da produção, os custos dos componentes necessários para as instalações vêm caindo em ritmo acelerado. A entrada de fabricante chineses no mercado de energia solar nos últimos anos puxou para baixo o custo dos componentes. Na figura 7.2, retirado da revista PV Magazine, podemos ver o rápido declínio, em Euros/Watt dos módulos do tipo silício cristalino e filme fino nos mercados da Alemanha, Japão e China no período de 2007 a 2011.



Figura 7.2 – Tendência do custo dos módulos (Euro/Watt) no período de 2007 a 2011 (PV Magazine)

Como não há fabricação local de células fotovoltaicas, o custo de uma instalação fotovoltaica no Brasil está diretamente ligado à variação do custo no exterior, e sendo assim, o custo dos módulos fotovoltaicos vem caindo rapidamente também no Brasil.

### 7.1. Custo Real na Instalação Proposta

Neste capítulo iremos avaliar o custo de projeto e instalação do sistema fotovoltaico apresentado no capítulo anterior, aplicado em um condomínio de prédios residenciais.

Os valores apresentados foram obtidos a partir de cotações feitas com distribuidores locais de módulos e inversores, e não a partir de importação direta.

Do capítulo anterior, temos que para suprir a demanda energética da área comum do condomínio serão necessários:

4 x Inversor de Frequência Eltek Valere modelo THEIA HE-t 4.4kW

96 x Módulo Fotovoltaico de 240W BYD Solar

Em cotações realizadas com alguns distribuidores nacionais, o melhor preço para cada equipamento foi escolhido neste trabalho, resultando:

Produto	Custo	Quantidade	Custo Total
Módulo FV BYD-240P6-30 240W	R\$ 899,00	96	R\$ 86.304,00
Eltek Valere THEIA HE-t 4.4kW	R\$ 7.399,00	4	R\$ 29.596,00
			<b>R\$ 115.900,00</b>

Tabela 7.1 – Custo dos componentes principais do sistema fotovoltaico

Também obtido através de cotações, foi constatado que o custo das estruturas e suportes necessários para a fixação dos módulos fotovoltaicos representa quase 40% do custo total dos próprios módulos. O custo de mão obra e materiais elétricos diversos como cabos e conectores são de cerca de 4% do custo total dos produtos.

Produto	Custo	Quantidade	Custo Total
Módulo FV BYD-240P6-30 240W	R\$ 899,00	96	R\$ 86.304,00
Eltek Valere THEIA HE-t 4.4kW	R\$ 7.399,00	4	R\$ 29.596,00
Estrutura de fixação dos módulos	R\$ 7.818,00	4	R\$ 31.272,00
Mão de obra e Materiais Elétricos	R\$ 6.132,00	4	R\$ 24.528,00
			<b>R\$ 171.700,00</b>

Tabela 7.2 – Custo dos componentes e mão de obra para instalação do sistema

O custo total do projeto será então de cerca de 172 mil reais.

Esse valor por si só não nos diz muito; para ter uma ideia melhor vamos comparar esse custo com o que seria gasto com a conta de energia elétrica da concessionária e calcular o payback simples dessa instalação:

Investimento na Geração FV	Consumo Mensal do Condomínio (kWh)	Custo do kWh residencial em SP + impostos (R\$/kWh)	Economia Anual	Payback (anos)
<b>R\$ 171.700,00</b>	<b>3.051</b>	<b>R\$ 0,38</b>	<b>R\$ 13.912,56</b>	<b>12,34</b>

Tabela 7.3 – Retorno simples do investimento no sistema fotovoltaico

Ou seja, seriam necessários quase 13 anos para se ter o retorno do investimento inicial na geração fotovoltaica própria. Do ponto de vista puramente financeiro, qualquer investidor classificaria o projeto como totalmente inviável devido ao seu longo tempo de retorno do investimento. Porém, se olharmos da perspectiva de uma família que compra ou constrói uma residência, que se pretende viver por muitos e muitos anos, as vezes até mesmo por toda a vida, os 13 anos de retorno talvez já não sejam tão grandes. Com essa ideia, vale a pena verificarmos mais a fundo se esse padrão de payback de mantém ao longo do tempo.

Quase que a totalidade dos fabricantes de módulos fotovoltaicos dão uma garantia de 25 anos contra uma perda de eficiência de não mais do que 20% ao longo dos anos. Isso significa que um módulo terá sua conversão energética reduzida em até 0,8% por ano ao longo de 25 anos.

Como pode-se ver na tabela 7.1.3, ajustando o tempo de retorno do investimento considerando-se a perda de eficiência anual dos módulos, o payback passa a ser de pouco mais de 13 anos, mas ao longo de sua vida útil mínima garantida pelo fabricante, o sistema irá gerar uma receita positiva de cerca de R\$ 144 mil reais. E o sistema continuará gerando por muitos outros anos, aumentando ainda mais a economia acumulada.

	Geração FV Mensal (kWh)	Custo do kWh da Concessionária (R\$)	Investimento Inicial (R\$)	
	<b>3051</b>	<b>0,38</b>	<b>-171.700,00</b>	
Período (ano)	Depreciação da Eficiência dos Módulos	Geração FV Anual (kWh)	Economizado (R\$)	Fluxo de Caixa (R\$)
1		36612	13.913	-157.787
2	0,80%	36319	13.801	-143.986
3	0,80%	36029	13.691	-130.295
4	0,80%	35740	13.581	-116.714
5	0,80%	35454	13.473	-103.241
6	0,80%	35171	13.365	-89.876
7	0,80%	34889	13.258	-76.618
8	0,80%	34610	13.152	-63.467
9	0,80%	34333	13.047	-50.420
10	0,80%	34059	12.942	-37.478
11	0,80%	33786	12.839	-24.639
12	0,80%	33516	12.736	-11.903
13	0,80%	33248	12.634	731
14	0,80%	32982	12.533	13.265
15	0,80%	32718	12.433	25.697
16	0,80%	32456	12.333	38.031
17	0,80%	32197	12.235	50.266
18	0,80%	31939	12.137	62.402
19	0,80%	31684	12.040	74.442
20	0,80%	31430	11.943	86.386
21	0,80%	31179	11.848	98.233
22	0,80%	30929	11.753	109.986
23	0,80%	30682	11.659	121.646
24	0,80%	30436	11.566	133.211
25	0,80%	30193	11.473	144.685
Total Economizado (R\$)				
<b>316.384,62</b>				
Payback Ajustado (anos)				
<b>12,94</b>				

Tabela 7.4 – Retorno do investimento considerando a perda de eficiência dos módulos ao longo do período de garantia

## 8. Conclusões

Ao longo deste trabalho, pode-se ver que o dimensionamento e implementação de um sistema solar fotovoltaico não chegam a ser complicados, mas se não nos atentarmos a alguns detalhes importantes, como a radiação solar típica de cada localidade da instalação, o correto posicionamento dos módulos fotovoltaicos e fatores que contribuem para a queda do desempenho global do sistema, podemos nos deparar com um resultando decepcionante na geração final. Porém, com um mínimo de conhecimento do tema e parâmetros de referência na hora de dimensionar o sistema, com certeza pode-se obter a geração de energia elétrica desejada.

O custo final de um sistema fotovoltaico instalado ainda é elevado se comparado ao custo do kWh fornecido pelas concessionárias locais. Vale ressaltar que, como identificado neste trabalho, um dos maiores custos do sistema foi a estrutura metálica necessária para a fixação dos módulos fotovoltaicos no telhado, com um custo de quase 20% o valor total do projeto, sendo mais caro até mesmo que os inversores de frequência, perdendo apenas para os módulos. Porém, o custo global vem decaindo rapidamente nos últimos anos, principalmente devido à queda vertiginosa do custo de produção dos módulos. Somado a essas recentes reduções nos custos de produção, a possibilidade de compensação do consumo com a produção de energia elétrica pelo consumidor final regulamentada pela ANEEL em abril deste ano de 2012, ajudou a reduzir ainda mais o tempo de retorno do valor investido no sistema. Se visto no longo prazo, já é viável, pois o sistema paga-se na metade do tempo da garantia mínima dada pelos fornecedores, respectivamente 13 e 25 anos.

Espera-se que com a continuação da queda dos custos, a geração fotovoltaica distribuída cairá definitivamente no gosto dos consumidores residenciais em poucos anos.

## 9. Referências Bibliográficas

- CEPEL – CRESEB. Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. Edição Especial PRC-PRODEEM. Rio de Janeiro, 2004. 207 p.
- ABINEE, Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. 2012. 176p
- CEPEL – ELETROBRAS et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife. Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.
- MACÊDO, W. N. Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. 2006. 183 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo.
- AYOMPE, L. M. et al. Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. Energy Conversion and Management, 2010. ISSN doi:10.1016/j.enconman.2010.08.007.
- KIMBER, A. et al. The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the southwest region of the United States, 2006. 2391 - 2395.
- ALMEIDA, M. P. Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. 2012. 173 p. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo
- SWERA, Solar and Wind Energy Assessment. INPE. Base de Dados Solar no ar desde 2001. Disponível em [http://maps.nrel.gov/swera?visible=swera\\_dni\\_nasa\\_lo\\_res&opacity=50&extent=-74.01,-33.74,-29.84,5.27](http://maps.nrel.gov/swera?visible=swera_dni_nasa_lo_res&opacity=50&extent=-74.01,-33.74,-29.84,5.27). Acesso em: 18 set. 2012
- REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>th</sup> Century. Renewables 2012. Global Status Report, 2012. 81p. Disponível em: <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/tabid/5434/Default.aspx>. Acesso em: 21/10/2012
- INMETRO. Portaria Inmetro/Dimel nº 0375 de 20 de dezembro de 2011. Rio de Janeiro, 2011. 9p. Disponível em:

<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/pam/pdf/PAM005234.pdf>. Acesso em:  
06/11/2012

PV MAGAZINE. PV Cheaper Than Reported. 2011. Disponível em:  
[http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/pv-cheaper-than-reported\\_100005289/#axzz29Odi19Qm](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/pv-cheaper-than-reported_100005289/#axzz29Odi19Qm). Acesso em: 03/10/2012

ECIL ENERGIA. Medidores Inteligentes de Energia. Disponível em:  
<http://www.ecilenergia.com.br/md2400.html>. Acesso em: 12/10/2012

ELTEK VALERE. Inversores Theia HE-t. Disponível em:  
[http://www.eltekvalere.com/wip4/detail\\_country.epl?cat=22790](http://www.eltekvalere.com/wip4/detail_country.epl?cat=22790). Acesso em  
05/10/2012

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Avanço Sólido das Células Solares Orgânicas.  
2012. Disponível em:  
<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celulas-solares-organicas-estado-solido&id=010115120528>. Acesso em: 07/09/2012