

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
JOÃO VÍTOR DE PAULA GONÇALVES**

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE AUXÍLIO NO DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**

**FORMIGA – MG  
2017**

2017

**JOÃO VÍTOR DE PAULA GONÇALVES**

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE AUXÍLIO NO DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. Renan Souza Moura.

**FORMIGA – MG**

**2017**

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

**JOÃO VÍTOR DE PAULA GONÇALVES**

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE AUXÍLIO NO DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Nota: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Renan Souza Moura

---

Prof. Msc. Carlos Renato Borges dos Santos

---

Prof. Dr. Ulysses Rondina Duarte

## RESUMO

A conscientização em todo o mundo com relação à sustentabilidade e questões ambientais possibilitou nos últimos anos o surgimento e evolução de fontes de energias alternativas. Dentre essas tecnologias, a geração de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica obteve um aumento exponencial nos últimos anos, graças às novas tecnologias de fabricação das placas solares e ao surgimento dos inversores fotovoltaicos que democratizaram o uso dessa tecnologia em todo o mundo. No Brasil, o incentivo por parte da Aneel, através da resolução normativa nº 482/2012, abriu as portas para o surgimento de inúmeras empresas nesse ramo, gerando empregos e energia de forma sustentável. O presente trabalho tem o intuito de apresentar uma ferramenta computacional que auxilia no dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede. A ferramenta desenvolvida em Java realiza o dimensionamento dos componentes elétricos necessários, extrai o diagrama elétrico unifilar do sistema e realiza um estudo sobre a viabilidade econômica do mesmo. Com isso, o *software* desenvolvido auxiliará o projetista minimizando o tempo gasto de projeto e garantindo maior confiabilidade nos resultados obtidos.

**Palavras chave:** Energias Alternativas, Ferramenta Computacional, Sistemas Fotovoltaicos.

## **ABSTRACT**

Global awareness of sustainability and environmental issues has made possible the emergence and evolution of alternative energy sources in the few years years. Among these technologies, the generation of electric energy by means of solar photovoltaic energy has increased exponentially in recent years, thanks to the new technologies of production of solar panels and the emergence of photovoltaic inverters that have democratized the use of this technology around the world. In Brazil, the Aneel's incentive, through Normative Resolution nº. 482/2012, gave opportunities for the emergence of countless companies in this branch, generating jobs and energy in a sustainable way. The present term paper intents to present, based on bibliographical references, a computational software that assists in the design of a photovoltaic system connected to the grid. The system to be developed in Java, performs the sizing of the necessary electrical components, exposes the unilateral electrical diagram of the software and conducts a study about the economic viability. Thereby, the software developed will help the designer minimize the time spent designing and ensuring greater reliability in the results obtained.

**Keywords:** Alternative Energy, Computational Software, Photovoltaic System.

## LISTA DE SIGLAS

AM – *Air Mass* – Massa de Ar

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

DHT – Distorção Harmônica Total

FDI – Fator de Dimensionamento de Inversor

HSP – Horas de Sol Pleno

IRENA – *International Renewable Energy Agency* – Agência Internacional de Energias Renováveis

IP – *Ingress Protection* – Índice e proteção

PWM – *Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SF – Sistema Fotovoltaico

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SPPM – Seguidor de Ponto de Potência Máxima

STC – *Standard Test Conditions* – Condições Padrão de Teste

TD – Taxa de Desempenho

WRC – *World Radiation Center* – Centro Mundial de Radiação

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Órbita da Terra em torno do Sol. ....	16
Figura 2.2 – Variação da Irradiância Extraterrestre.....	17
Figura 2.3 – Fluxo médio anual recebido em um dia em $W/m^2$ .....	18
Figura 2.4 – Componentes de uma radiação solar.....	19
Figura 2.5 – Mapa de irradiação solar médio anual.....	20
Figura 2.6 – Comparação entre a grandeza HSP e irradiância diária. ....	22
Figura 2.7 – Fluxo de elétrons e lacunas durante efeito fotoelétrico. ....	24
Figura 2.8 – Células monocristalinas em diversos formatos. ....	25
Figura 2.9 – Células fotovoltaicas policristalinas sem camada de reflexão (a), com camada de reflexão (b) e com filamentos elétricos (c).....	26
Figura 2.10 – Curva característica I-V.....	28
Figura 2.11 – Curva característica de uma associação em série.....	29
Figura 2.12 – Curva característica de uma associação em paralelo.....	30
Figura 2.13 – Influência da irradiância solar (a) e da temperatura (b) sobre a tensão e corrente gerados. ....	31
Figura 2.14 – Curva característica de um módulo fotovoltaico.....	33
Figura 2.15 – Módulo fotovoltaico 60 células CANADIAN SOLAR.....	35
Figura 2.16 – Inversor grid-tie de dois estágios. ....	37
Figura 2.17 – Inversor FRONIOUS (à esquerda) e inversor ABB (à direita). ....	40
Figura 2.18 – Faixa de operação do inversor e do SPPM. ....	43
Figura 3.1 – Histórico de consumo de uma conta de energia elétrica. ....	46
Figura 3.2 – Fluxograma do software proposto.....	49
Figura 4.1 – Interface desenvolvida. (a) Entrada de Dados. (b) Dados de saída. .....	50
Figura 4.2 – Lista de materiais para exemplo da Figura 3.1. ....	51
Figura 4.3 – Diagrama elétrico unifilar para exemplo da Figura 3.1. ....	52
Figura 4.4 – Análise Econômica para exemplo da Figura 3.1.....	52
Figura 4.5 – Lista de materiais para residência comum. ....	54
Figura 4.6 – Diagrama elétrico unifilar para residência comum.....	55
Figura 4.7 – Análise Econômica para residência comum.....	56
Figura 4.8 – Sistema gerado pela planilha para residência comum. ....	56
Figura 4.9 – Lista de materiais para fazenda cafeeira.....	58
Figura 4.10 – Diagrama elétrico unifilar para fazenda cafeeira. ....	58
Figura 4.11 – Análise Econômica para fazenda cafeeira. ....	59
Figura 4.12 - Sistema gerado pela planilha para fazenda cafeeira.....	59
Figura 4.13 – Lista de materiais para fazenda de búfalos. ....	61
Figura 4.14 – Diagrama elétrico unifilar para fazenda de búfalos.....	61
Figura 4.15 – Análise econômica para fazenda de búfalos. ....	62
Figura 4.16 – Sistema gerado pela planilha para fazenda de búfalos. ....	63



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2 – Dados elétricos do módulo CANADIAN 60 células sob condições STC.....	34
Tabela 3.1 – HSP de cada região brasileira.....	47
Tabela 4.1 – Histórico de consumo residência.....	53
Tabela 4.2 – Histórico de consumo fazenda cafeeira.....	57
Tabela 4.3 – Histórico de consumo fazenda de búfalos. ....	60

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1. Justificativa .....	13
1.2. Objetivos geral e específicos.....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 Recurso Solar .....	15
2.1.1 Geometria Sol-Terra.....	15
2.1.2 Radiação Solar sobre a Terra.....	17
2.1.3 Distribuição da irradiação solar média diária no Brasil.....	20
2.1.4 Avaliação do Recurso Solar .....	21
2.2 Células Fotovoltaicas .....	22
2.2.1 Processo de Fabricação das Células Fotovoltaicas .....	23
2.2.2 Tipos de Células Fotovoltaicas.....	24
2.2.3 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas.....	27
2.2.4 Associação de Células Fotovoltaicas .....	28
2.3 Componentes de um Gerador Fotovoltaico Conectado à Rede .....	31
2.3.1 Módulos Fotovoltaicos .....	32
2.3.2 Inversor Grid-Tie .....	35
2.4 Dimensionamento de um SFCR .....	40
2.4.1 Dimensionamento do gerador fotovoltaico .....	40
2.4.2 Dimensionamento do inversor.....	41
2.4.3 Arranjo série/paralelo dos módulos fotovoltaicos .....	42
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>44</b>
3.1 Dados de Entrada .....	44
3.1.1 Consumo de energia elétrica .....	45
3.1.2 Irradiância Solar .....	46
3.2 Dados de Saída .....	47
3.3 Estratégias utilizadas .....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>50</b>
4.1 SonneProgram .....	50
4.1.1 Interface para usuário.....	50
4.1.2 Dados de saída.....	51
4.3 Estudos de caso .....	53

4.3.1 Residência Comum .....	53
4.3.2 Fazenda Cafeeira.....	57
4.3.3 Fazenda de Búfalos.....	60
5 CONCLUSÃO .....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a evolução das energias renováveis vem quebrando recordes a cada ano em todo o mundo. De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis, IRENA (*International Renewable Energy Agency*), através de uma publicação em seu site no dia 30 de março de 2017, o ano de 2016 foi o de maior adição de geração de energia elétrica por fontes renováveis de toda a história com um aumento na geração em relação ao ano anterior em 161 *gigawatts* (GW), alcançando uma capacidade total de 2006 GW. Dentre as energias renováveis responsáveis por esse aumento, a energia solar fotovoltaica teve o maior crescimento dentre todas as outras fontes (IRENA, 2017).

A energia fotovoltaica se mostrou atraente, pois o Sol, a fonte desta energia, produz energia à terra de forma inesgotável. Por isso, houve um crescimento elevado no desenvolvimento de tecnologias que permitiram uma conversão de energia de maior eficiência ao longo dos anos. Isso permitiu, então, a produção em larga escala dos componentes que fazem parte de um sistema fotovoltaico, diminuindo o preço final desses sistemas. Com isso, a tecnologia se disseminou como uma forma sustentável e relativamente barata para geração de energia elétrica. No início do terceiro milênio, os sistemas fotovoltaicos se consistiam basicamente de sistemas isolados, porém, com o desenvolvimento de novas tecnologias e de normas regulamentadoras, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) constituem 95% de todos os sistemas instalados atualmente. Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou uma resolução normativa nº482, hoje RN nº 517, que regulamentou as micro e mini gerações distribuídas no país, estabelecendo as condições básicas para o funcionamento do sistema de compensação de energia (EPE, 2014).

Através de incentivos por parte da ANEEL e do Ministério de Minas e Energia, através do Programa de Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), o Brasil estará entre os maiores produtores de energia solar em 2018, como afirma o site do Governo Federal (PORTAL BRASIL, 2016). No ano de 2016, o setor solar cresceu cerca de 300% e possui uma projeção de crescimento ainda maior para os próximos

anos. Isso atrai novos investimentos, empresas, serviços e capital para a área de energia solar no Brasil (PENSAMENTO VERDE, 2016).

### **1.1. Justificativa**

Através dos dados apresentados anteriormente, observa-se o crescimento exponencial dessa tecnologia, não só no Brasil, como em todo o mundo, destacando-se os SFCR, que constituem cerca de 95% do total dos sistemas fotovoltaicos instalados. Observando-se a demanda de vários projetos de SFCR e a necessidade de torná-los mais precisos e confiáveis, sendo realizados num período de tempo menor. Este trabalho tem a finalidade de apresentar um *software* que auxilia projetistas no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, que, a partir de poucos parâmetros de entrada, apresente um SFCR dimensionado, bem como a lista de materiais, diagrama elétrico unifilar e o estudo de viabilidade econômica.

### **1.2. Objetivos geral e específicos**

O objetivo geral desta monografia é apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de cálculo e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Para a consolidação deste objetivo é necessário realizar estudos prévios como o funcionamento técnico de sistemas fotovoltaicos (SF), bem como o entendimento de cada componente que constitui um SF e o modo de seu dimensionamento.

### **1.3. Metodologia**

Desenvolveu-se o *software* de auxílio no dimensionamento utilizando a linguagem computacional JAVA. A ferramenta foi desenvolvida para atuar em ambiente computacional Windows em *desktop*. Através de uma interface simples e de fácil manuseio, o *software* realiza cálculos para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e a partir de um banco de dados fornece a lista de material, diagrama elétrico unifilar e um estudo de viabilidade econômica simplificado.

### **1.4. Organização do trabalho**

Este trabalho está disposto em cinco capítulos, no qual é primeiro introduzido o tema e a justificativa do desenvolvimento do mesmo. No segundo capítulo é apresentado um estudo dos componentes utilizados em um sistema fotovoltaico conectado à rede, bem como o dimensionamento dos mesmos. No terceiro capítulo é abordada a estratégia utilizada para o desenvolvimento do *software* e as variáveis de entrada e saída adotadas. No quarto capítulo é apresentado estudos realizados com o *software*, demonstrando os resultados gerados para diferentes tipos de estudos de caso. Após os resultados é apresentado, no capítulo cinco, uma conclusão sobre este trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta um estudo teórico sobre a tecnologia fotovoltaica, apresenta os princípios básicos de funcionamento, as tecnologias envolvidas, os componentes utilizados, como é estruturado um gerador fotovoltaico e os itens abordados para o dimensionamento do mesmo.

### **2.1 Recurso Solar**

É indiscutível que o Sol é a principal fonte de energia para o planeta Terra. Dele provém o calor e outros tipos de radiação que permitem a existência da vida na Terra. Considerando o tempo de existência da humanidade, pode-se dizer que o Sol é uma fonte de energia inesgotável e já há algum tempo tem sido utilizado para economia no setor elétrico com a utilização da tecnologia solar térmica.

Para entender melhor como o recurso solar influencia no dimensionamento de um sistema fotovoltaico é preciso estudar como a Terra se comporta em seu movimento em torno do Sol e as características desse movimento.

#### **2.1.1 Geometria Sol-Terra**

O movimento de translação da Terra é caracterizado por uma trajetória elíptica, onde a Terra apresenta uma inclinação de aproximadamente  $23,45^\circ$  em relação ao plano elíptico desenvolvido em torno do Sol. Essa inclinação, aliada ao movimento da Terra em torno do Sol, é responsável pelo surgimento das estações do ano. Com o decorrer do ano, a inclinação dos raios solares em relação à linha do equador varia de  $-23,45^\circ$ , no solstício de verão do hemisfério Sul, à  $23,45^\circ$ , no solstício de inverno do hemisfério sul. Esta inclinação é denominada “Declinação Solar” e apresenta ângulo nulo para os equinócios (CEPEL, 2014). A Figura 2.1 ilustra o movimento de translação da Terra.

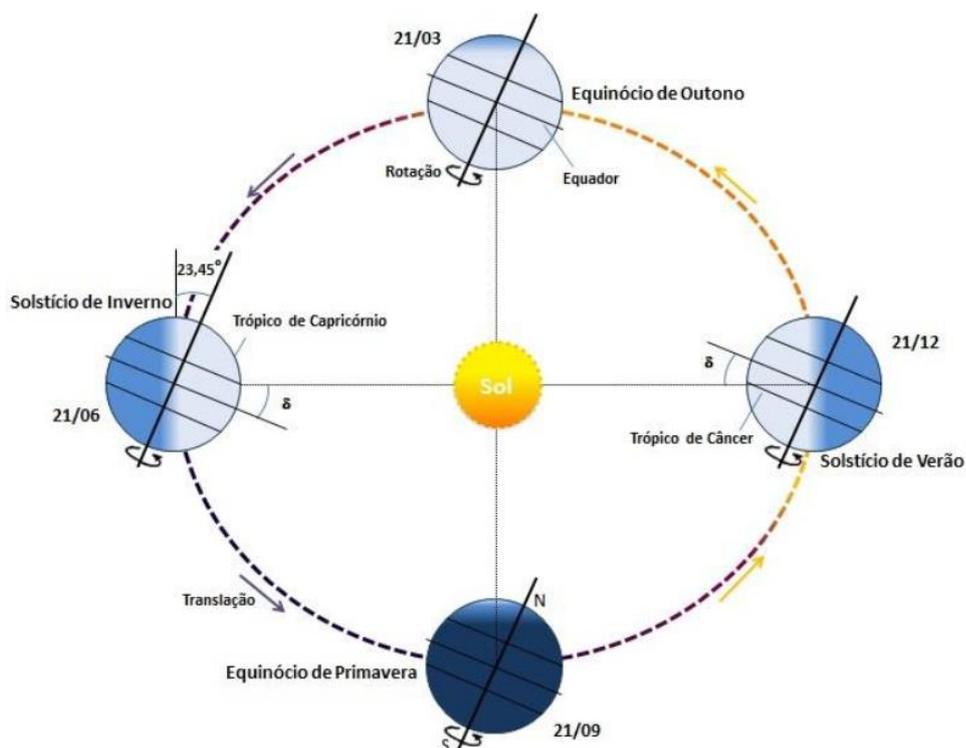


Figura 2.1 – Órbita da Terra em torno do Sol.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

A radiação solar incidente sobre a superfície terrestre pode ser referenciado em termo de potência ou de energia incidente sendo denominado como irradiância solar e irradiação solar, respectivamente. A irradiância extraterrestre, ou seja, aquela que incide sobre a camada externa da atmosfera, varia de acordo com o período anual em função da constante solar  $I_0$ , adotado pelo WRC – Centro Mundial de Radiação (*World Radiation Center*) como  $1.367 \text{ W/m}^2$ , e varia como mostrado na Figura 2.2 (CEPEL, 2014).

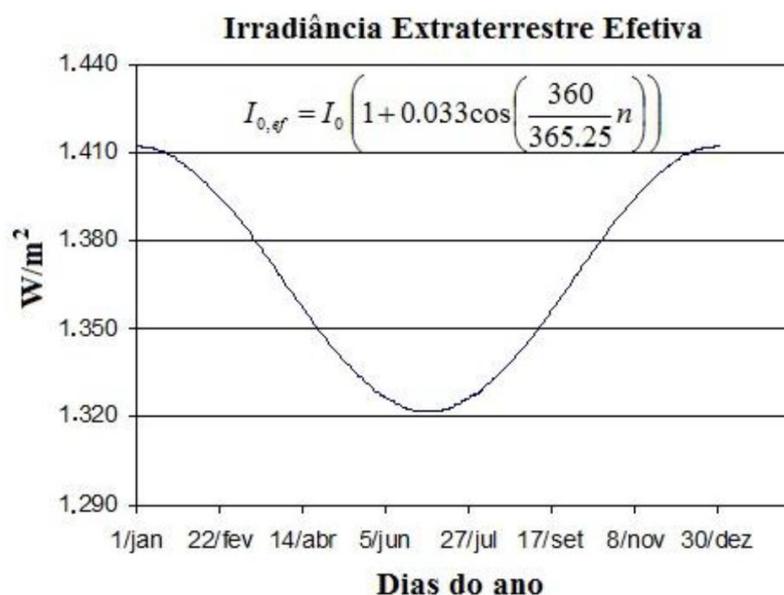


Figura 2.2 – Variação da Irradiância Extraterrestre.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

Desta irradiância total, apenas uma parte atinge a superfície terrestre. As demais porções são refletidas, absorvidas por gases ou dispersas por poeira e partículas de poluição. A irradiância extraterrestre atinge níveis de até 1000 W/m<sup>2</sup> ao meio dia, independente da localização. Esse valor é adotado como padrão na indústria fotovoltaica para teste e avaliação dos módulos fotovoltaicos (VILLALVA, 2012).

### 2.1.2 Radiação Solar sobre a Terra

De toda a energia disponibilizada pelo Sol à Terra, cerca de 174 mil TW (terawatts), apenas 54% chega à superfície, 87% dessa porção é absorvida e 13% é refletida pela superfície terrestre, ou seja, aproximadamente 94 mil TW de potência solar é disponibilizada à Terra. A Figura 2.3 apresenta o fluxo de potência na atmosfera e superfície terrestre.

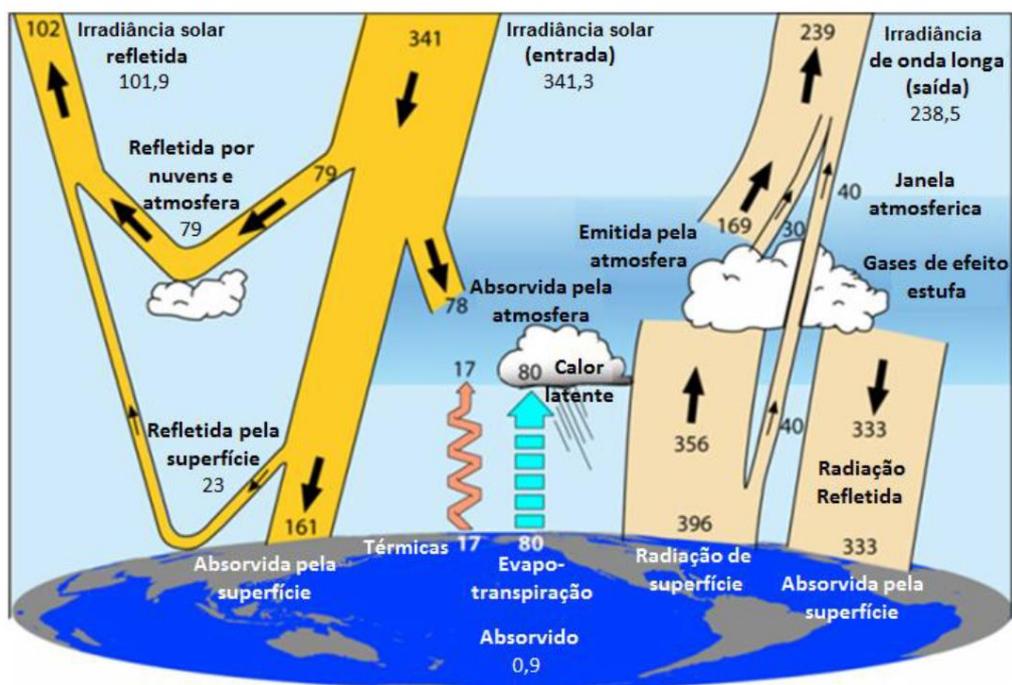


Figura 2.3 – Fluxo médio anual recebido em um dia em  $W/m^2$ .

Fonte: Retirado de TRENBERTH *et al.*, 2009.

Considerando-se uma superfície receptora, assim como um módulo fotovoltaico, existem três tipos de componentes da radiação incidente sobre ela. A radiação direta é aquela que provém diretamente do Sol sem sofrer nenhuma alteração em sua trajetória, a radiação difusa é aquela resultante do espalhamento da radiação extraterrestre na atmosfera e a radiação albedo que é a porção refletida de outras superfícies próximas à recepção desta radiação, como por exemplo a radiação refletida por um gramado, por um prédio espelhado, dentre outros. Portanto, a radiação total será a soma destas três componentes (CEPEL, 2014). A Figura 2.4 ilustra o descrito acima.

A radiação difusa, ao passar pela atmosfera, sofre alterações em suas características como intensidade, distribuição espectral e angular, e essas modificações estão ligadas à espessura da camada de ar que compõe a atmosfera naquele local.

A espessura da camada de ar atravessada pelos raios solares depende do comprimento do trajeto feito por eles, portanto, depende também do ângulo azimutal, que é formado pelo raios solares e o vetor normal à superfície horizontal. Quanto maior é este ângulo maior será as alterações na radiação difusa.

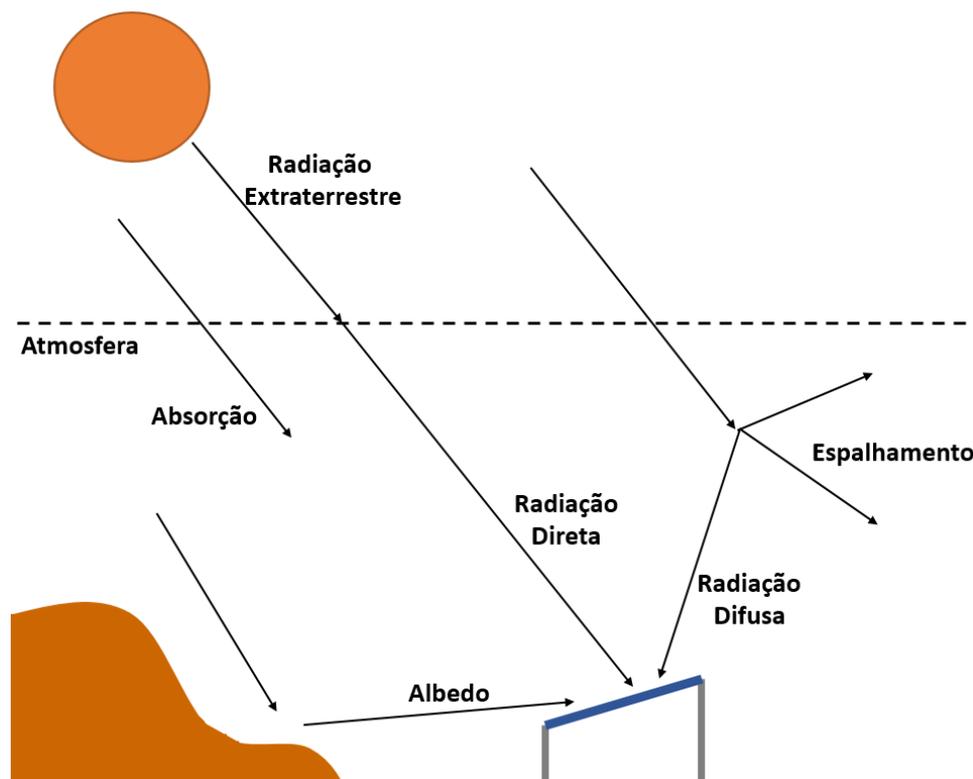


Figura 2.4 – Componentes de uma radiação solar.

Fonte: Do próprio autor.

A massa de ar,  $AM$  – *Air Mass*, pode ser calculada através da Equação 2.1. Onde  $\theta_z$  é o ângulo azimutal.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.1)$$

Normalmente alguns valores de massa de ar são predefinidos e representam situações típicas da inclinação dos raios solares em relação à superfície horizontal.  $AM1$ , por exemplo, representa massa de ar igual a 1 e equivale a um ângulo azimutal igual a 0, ou seja, os raios solares incidem perpendicularmente à superfície terrestre.  $AM0$  representa a ausência de massa de ar para os raios solares sofrerem alteração, ou seja, representa a irradiância extraterrestre.

### 2.1.3 Distribuição da irradiação solar média diária no Brasil

O estudo da distribuição da irradiação solar média diária se torna importante no dimensionamento de um sistema fotovoltaico, já que ele permite calcular a energia elétrica a ser convertida por um gerador fotovoltaico. O mapa apresentado na Figura 2.5 apresenta a radiação solar média anual no país e é extremamente útil para o desenvolvimento de um SFCR. Os valores típicos de irradiância média para aplicações fotovoltaicas variam de 3 a 4 kWh/(m<sup>2</sup>.dia). A análise da Figura 2.5 permite concluir que o Brasil possui excelente capacidade de geração de energia solar, já que em sua totalidade territorial os índices de irradiação são melhores que os valores típicos utilizados em aplicações fotovoltaicas.

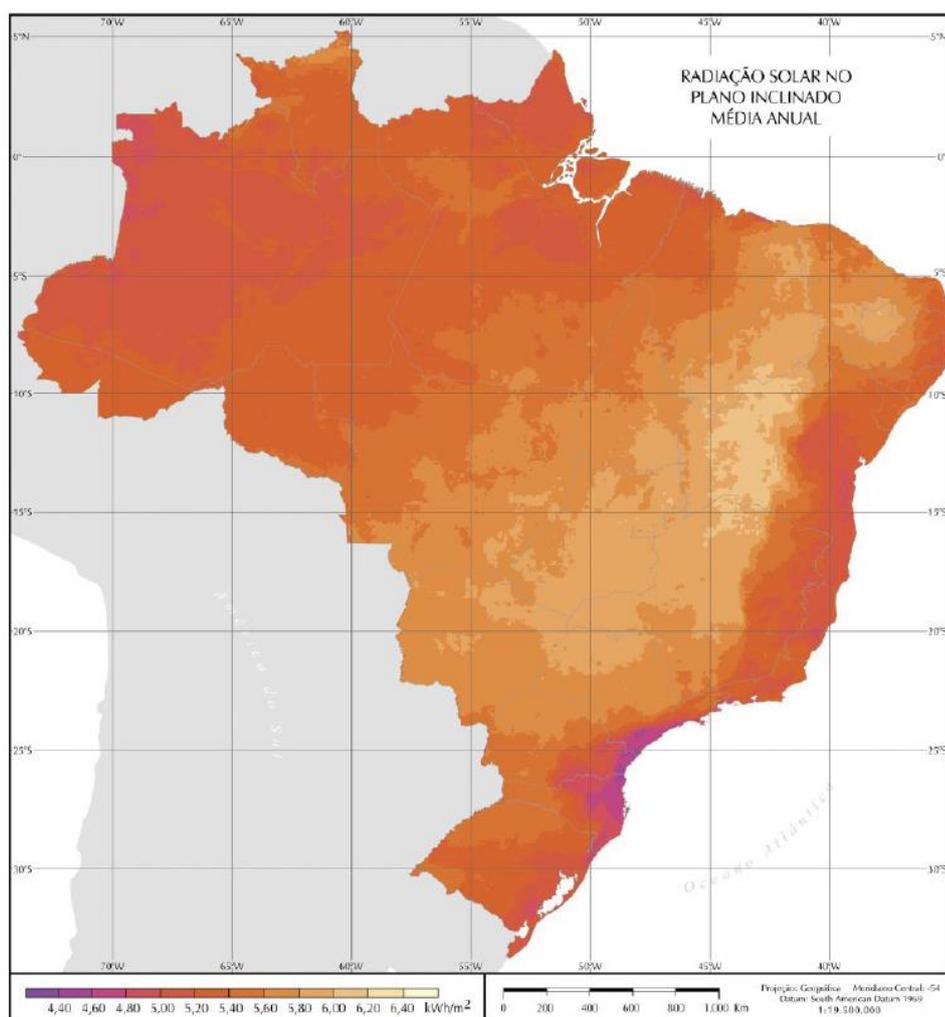


Figura 2.5 – Mapa de irradiação solar médio anual.

Fonte: Retirado de PEREIRA, 2006.

### 2.1.4 Avaliação do Recurso Solar

O recurso solar é o ponto de partida de qualquer projeto fotovoltaico, pois a partir da disponibilidade de irradiância solar média anual do local é que o sistema é dimensionado. Um SFCR tem suas características elétricas dependentes basicamente da irradiância solar e da temperatura dos módulos, sendo o segundo de menor impacto e significância para a eficiência do gerador solar.

As formas mais comuns de apresentar os dados de irradiância solar em aplicações fotovoltaicas é por médias mensais ou anuais para a energia acumulada diariamente. Quando apresentado em forma anual, esse dado é normalmente chamado de “Ano Meteorológico Típico”. Essa representação foi proposta para anular os efeitos da radiação instantânea que pode variar em função de nuvens e sombreamentos passageiros e que, a longo prazo, não causa efeito significativo na produção de energia.

Para amenizar os efeitos temporários de variação momentânea da irradiância, tornou-se conveniente representar a irradiância total diária em uma grandeza chamada “Horas de Sol Pleno” (HSP), que informa o número de horas em que a irradiância foi constante e igual a  $1 \text{ kW/m}^2$ , sendo equivalente à energia disponibilizada pelo sol em certo dia. Logo, para um dia em que houve uma irradiação de  $4 \text{ kWh/m}^2$  a quantidade de HSP será:

$$HSP = \frac{4 \text{ kWh/m}^2}{1 \text{ kWh/m}^2} = 4 \text{ h/dia}$$

A Figura 2.6 reforça o conceito de HSP e ajuda em sua compreensão. Normalmente a irradiância média mensal é convertida para seu valor diário em  $\text{kWh/m}^2$  e depois utiliza-se o valor em HSP para o dimensionamento do SFCR (CEPEL, 2014).

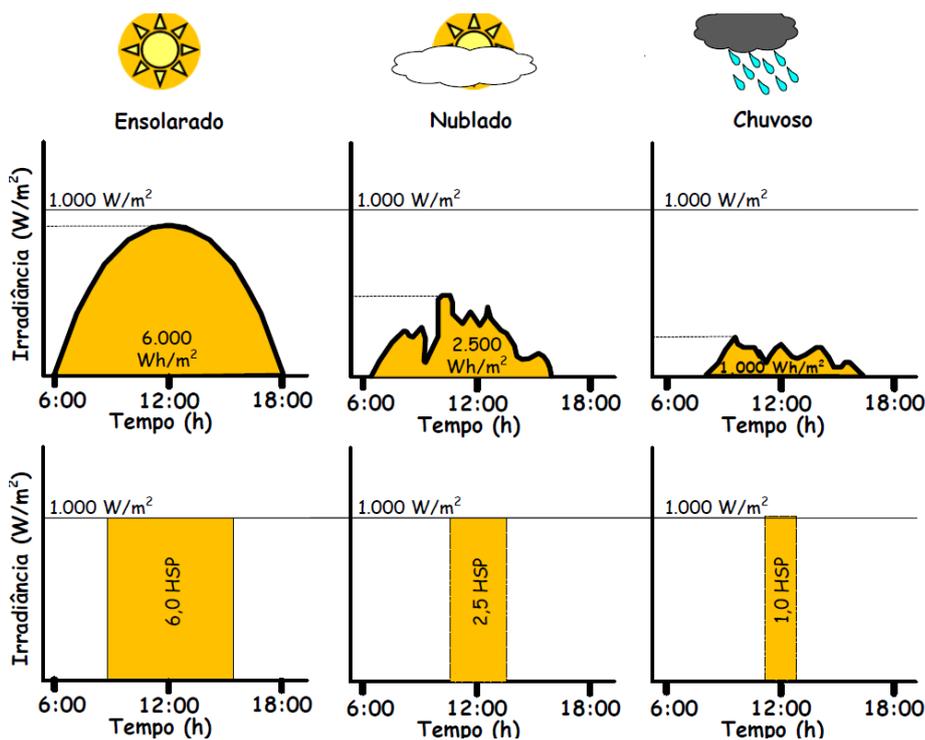


Figura 2.6 – Comparação entre a grandeza HSP e irradiância diária.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

## 2.2 Células Fotovoltaicas

As células e módulos fotovoltaicos são os componentes de um SFCR responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica. Funcionam a partir do fenômeno fotovoltaico descoberto por Becquerel em 1839 que observou o surgimento de uma diferença de potencial em uma solução ácida a partir da iluminação da mesma.

Os componentes capazes de transformar a energia solar em elétrica são construídos a partir de semicondutores, um material elétrico que possui características elétricas intermediárias de um material condutor e isolante. Os principais elementos que fazem parte deste grupo estão localizados na tabela periódica nos grupos 14 a 16, sendo os principais utilizados na indústria o Silício (Si), Germânio (Ge), Arsênio (As), etc (CEPEL, 2014).

Os semicondutores, quando condicionados a temperaturas muito baixas, comportam-se como isolantes, possuindo a banda de valência totalmente preenchida e a banda de condução totalmente vazia com um gap de energia, entre as bandas, de aproximadamente 1 eV. O baixo gap de energia permite que fótons, unidade elementar das ondas eletromagnéticas, energizem elétrons da banda de valência até que estes saltem para a banda de condução, criando assim uma corrente elétrica, transformando uma radiação solar em energia elétrica. Para que esse efeito aconteça de forma eficaz é necessário a dopagem dos elementos puros, já que estes têm a capacidade de recombinar elétrons e lacunas voltando ao estado original de não condutância (BLUESOL, 2014).

### **2.2.1 Processo de Fabricação das Células Fotovoltaicas**

O elemento mais utilizado na fabricação de células fotovoltaicas é o silício, por sua abundância no planeta terra e por já ser um elemento largamente utilizado na indústria eletrônica. Cada elemento de Si possui quatro elétrons na camada de valência, quando ligado a outro elemento em uma rede cristalina, por exemplo, esse elemento adquire estabilidade a partir do compartilhamento dos elétrons. Isso transforma o cristal em um isolante, impedindo a ocorrência do efeito fotoelétrico.

Como solução, ao cristal de silício é introduzido outros elementos, normalmente da família 3A ou 5A, num processo conhecido como dopagem que altera a rede cristalina. Quando há dopagem com elementos da família 5A, um elétron ficará livre permitindo que com pouca energia, provinda dos fótons, este alcance a banda de condução e crie o efeito fotovoltaico. Este tipo de material é conhecido como material tipo n. Semelhantemente, quando a rede cristalina recebe elementos da família 3A, há um déficit de um elétron na rede, esse “espaço” é chamado de lacuna e através de uma pequena energia essa lacuna atrairá um elétron vizinho, originando o efeito fotoelétrico. Este tipo de material é chamado de material tipo p.

Uma célula fotovoltaica é composta por materiais tipo p e tipo n e quando é submetida à irradiância solar, os fótons, provindos do Sol, incidem sobre a superfície da célula fazendo com que os elétrons livres do material tipo n migrem para as lacunas existentes no material tipo p, surgindo assim uma diferença de potencial elétrico entre

as camadas (BLUESOL, 2014). A Figura 2.7 consegue ilustrar o fluxo de elétrons e lacunas entre os materiais.

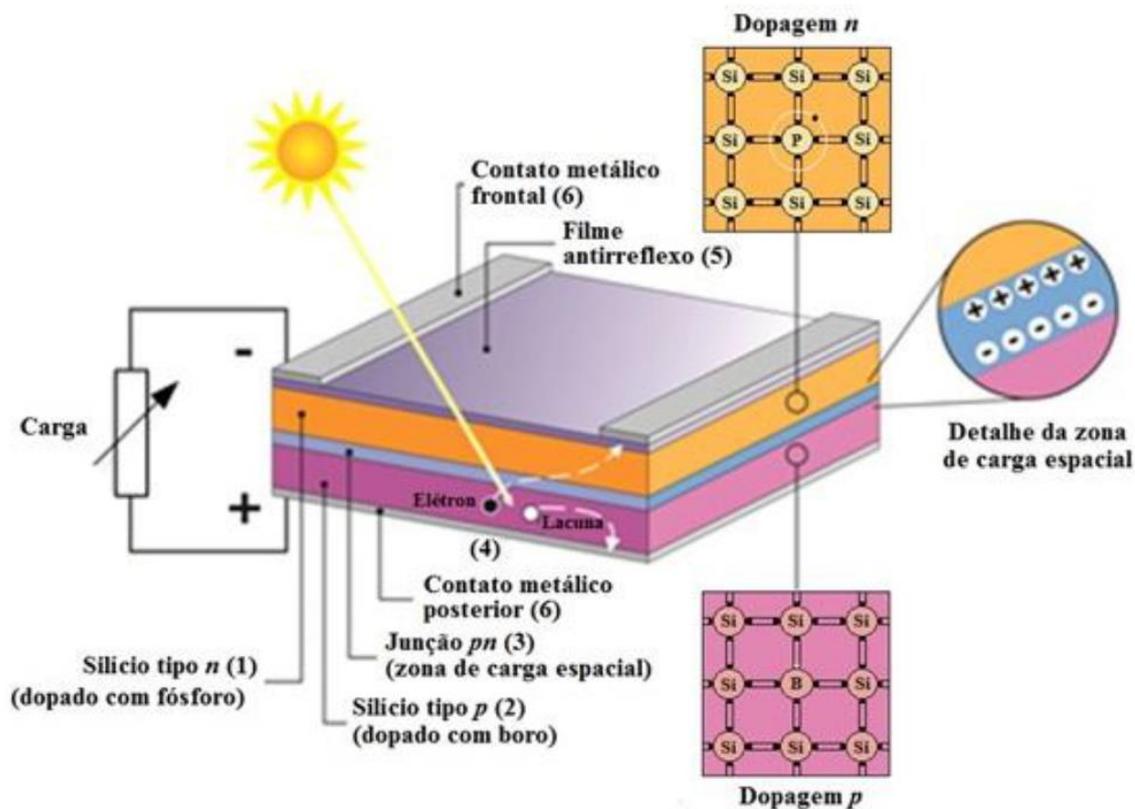


Figura 2.7 – Fluxo de elétrons e lacunas durante efeito fotoelétrico.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

### 2.2.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

Atualmente existem vários tipos de tecnologias de fabricação das células fotovoltaicas, cada tecnologia apresenta um arranjo cristalino diferente para que determinada característica de aplicação seja alcançada. As mais comuns são a do silício monocristalino e a do silício policristalino, devido aos processos de fabricação.

### 2.2.2.1 Silício monocristalino

No processo de refinamento do silício, blocos ultrapuros são obtidos a partir de cristais de quartzo. Estes blocos são submetidos a um processo chamado método de Czochralski, em que os blocos são aquecidos a altas temperaturas. Durante esse processo os átomos de silício se dispõem de forma homogênea em um única formação cristalina, chamada monocristal. Após esse processo o cristal é cortado e recebe dopagem de materiais do tipo p e n para potencializar o efeito fotovoltaico no cristal. Por último, o cristal recebe o acabamento, que consiste em um película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra e uma camada de um material antireflexivo na face que receberá a luz para aumentar a eficiência no processo de conversão da energia solar (VILLALVA, 2012).

A célula, ao final de sua fabricação, apresenta homogeneidade em sua superfície, que possui uma coloração azul escuro ou preto, mas pode apresentar outras colocações diante do tratamento antireflexivo. As células de silício monocristalizadas, por seu processo de fabricação, possuem a maior eficiência diante aos demais tipos fabricados, com uma eficiência que varia de 15% a 18%, mas apresenta o maior custo de fabricação. Pela sua fragilidade mecânica, as células fotovoltaicas são arranjadas em módulos fotovoltaicos, que possuem uma configuração específica de células ligadas em série e paralelo para atingir características de uso prático (VILLALVA, 2012). A Figura 2.8 apresenta as células monocristalinas já na fase final de fabricação.

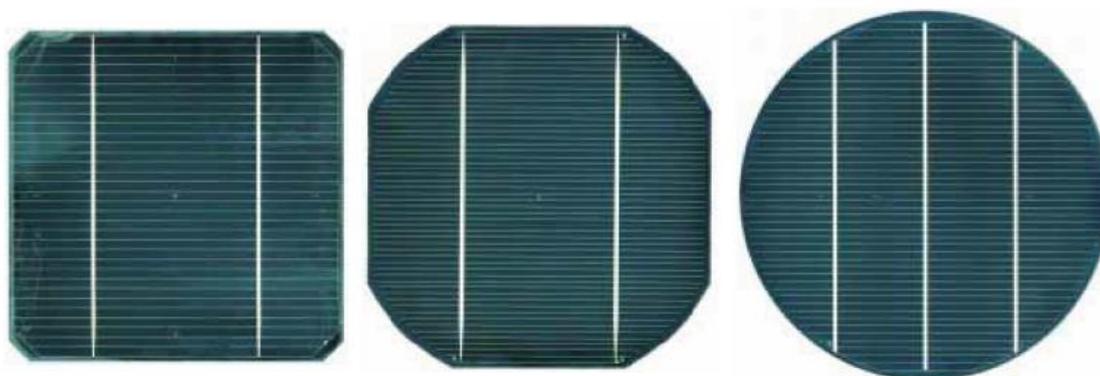


Figura 2.8 – Células monocristalinas em diversos formatos.

Fonte: Retirado de PORTAL ENERGIA, 2004.

### 2.2.2.2 Silício Policristalino

O processo de fabricação do silício policristalino, em comparação ao processo anterior, é mais barato. O lingote é formado por vários pequenos cristais de tamanho e orientações distintas entre si, o que adquire ao silício policristalino a característica heterogênea. Esta peça é então processada dando origem aos *waffers* que são transformados em células fotovoltaicas. Semelhantemente à célula monocristalina, esta apresenta uma cor azulada que pode assumir uma coloração diferente.

Por sua formação não homogênea a célula policristalina apresenta uma eficiência menor, em torno de 13% a 15%, uma diferença bem pequena que é compensada pelo baixo preço de sua fabricação se comparado à célula monocristalina. O silício policristalino também apresenta baixa resistência mecânica, tornando necessário seu arranjo em módulos fotovoltaicos, semelhante ao processo aplicado em células monocristalinas (VILLALVA, 2012). A Figura 2.9 apresenta as células policristalinas prontas para uso prático.

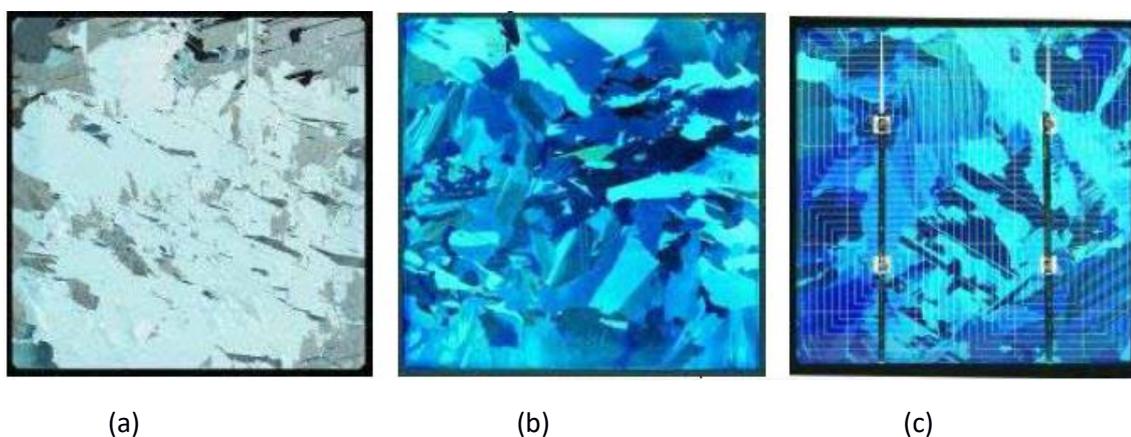


Figura 2.9 – Células fotovoltaicas policristalinas sem camada de reflexão (a), com camada de reflexão (b) e com filamentos elétricos (c).

Fonte: Retirado de PORTAL ENERGIA, 2004.

### 2.2.3 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas

Como principal componente no sistema de conversão de energia solar em elétrica, as células fotovoltaicas possuem suas características elétricas que são de suma importância no dimensionamento de um SFCR.

#### 2.2.3.1 Curva I-V

A curva I-V é a curva característica que descreve o comportamento da corrente da célula em função da diferença de potencial nos terminais da placa, essa corrente também é definida como a soma da corrente provinda da junção pn do material semiconductor e da corrente fornecida pelos fótons da radiação solar. Esta curva pode ser descrita pela Equação 2.2 que é derivada da equação de Shockley (CEPEL, 2014).

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2.2)$$

Onde:

$I_L$  → corrente fotogerada (A);

$I_0$  → corrente de saturação reversa (A);

$n$  → fator de idealidade do diodo;

$q$  → carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$k$  → constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  → temperatura absoluta (K);

$R_S$  → resistência em série dos componentes da célula fotovoltaica;

$R_T$  → resistência em série dos componentes da célula fotovoltaica;

A corrente de saturação reversa pode ser obtida a partir de experimento através da aplicação da tensão  $V_{oc}$  nos terminais da célula em um ambiente escuro. A Figura 2.10 apresenta a curva característica I-V de uma célula.

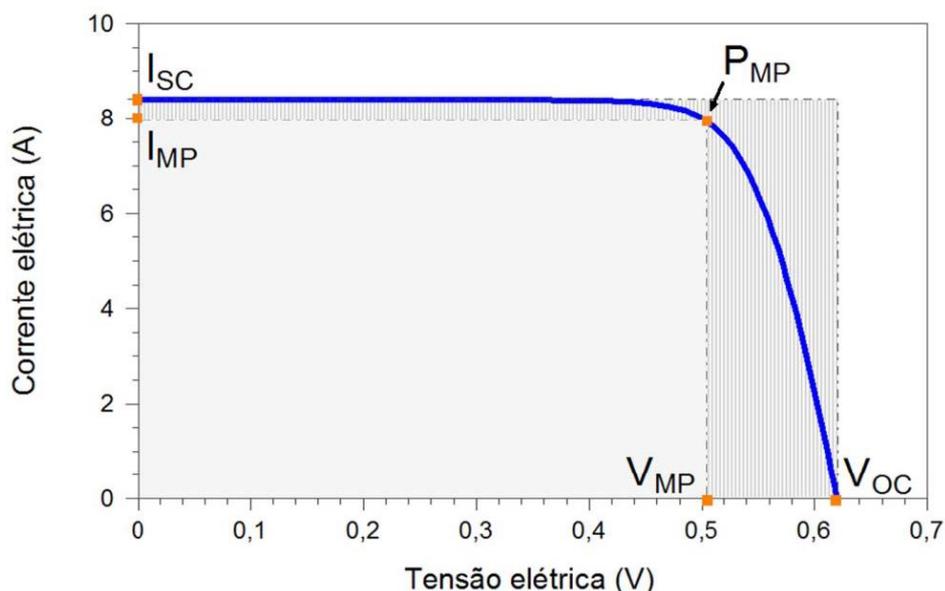


Figura 2.10 – Curva característica I-V.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

Analisando-se a imagem é possível notar cinco variáveis importantes que estão relacionadas à curva I-V. Trata-se da corrente de curto-circuito ou corrente máxima da célula fotovoltaica ( $I_{SC}$ ), da tensão de circuito aberto ou tensão máxima ( $V_{OC}$ ), o ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ ) e a tensão e corrente de máxima potência que são os valores correspondente ao ponto de máxima potência.

#### 2.2.4 Associação de Células Fotovoltaicas

A associação de células e módulos tem o objetivo de obter valores de tensão e corrente satisfatórios a aplicação desejada. Quando deseja-se obter um maior nível de tensão esses dispositivos devem ser conectados em série, logo, a tensão resultante será a soma das tensões de cada dispositivo. Se a necessidade é o aumento de corrente, o arranjo utilizado é a disposição em paralelo dos componentes para que a corrente de saída seja a soma de cada corrente gerada individualmente.

Um módulo fotovoltaico é o arranjo de associações em série e/ou paralelo de várias células fotovoltaicas. De maneira análoga, um arranjo fotovoltaico é a associação em série e/ou paralelo de vários módulos fotovoltaicos.

### 2.2.4.1 Associação em Série

Uma associação em série permite a elevação da tensão do conjunto de componentes fotovoltaicos. Através desse arranjo é possível aumentar a tensão entre os terminais do arranjo ligando-se o terminal positivo de um componente ao terminal negativo do outro, assim por diante. É importante ressaltar que a corrente resultante não é alterada por esta configuração, já que a mesma corrente circula por todos os dispositivos do arranjo. A Equação 2.3 descreve o comportamento desse tipo de associação. A Figura 2.11 apresenta a curva característica I-V resultante.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.3)$$

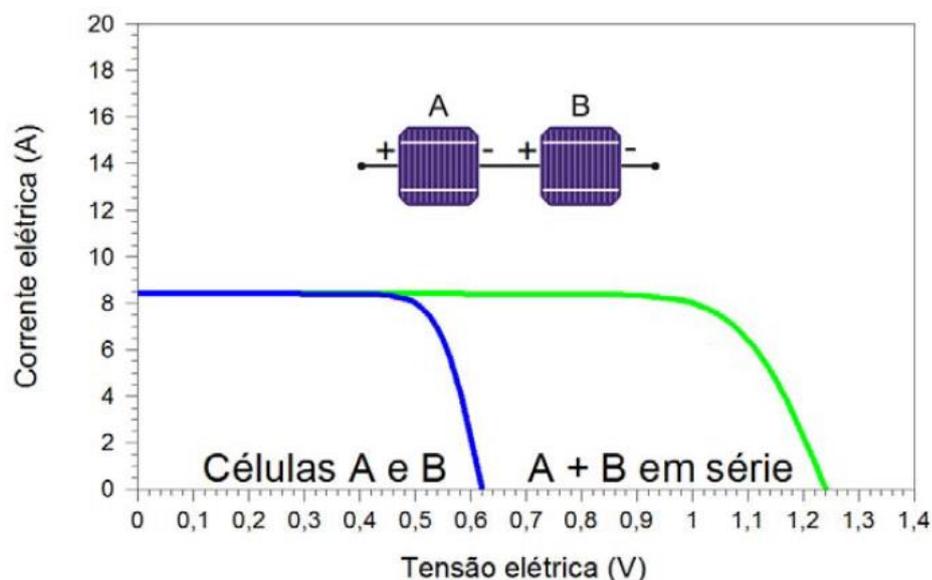


Figura 2.11 – Curva característica de uma associação em série.

Fonte: Retirado de CEPTEL, 2014.

### 2.2.4.2 Associação em Paralelo

Semelhantemente à associação anterior, este arranjo permite o ajuste da corrente gerado pelo conjunto dos dispositivos nele presente. Quando dispostos em paralelo, os componentes estão sujeitos à mesma tensão e nos terminais do arranjo a corrente de saída será a soma das correntes de cada dispositivo fotovoltaico, obedecendo à Equação 2.4. A Figura 2.12 apresenta a curva resultante deste arranjo.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.4)$$

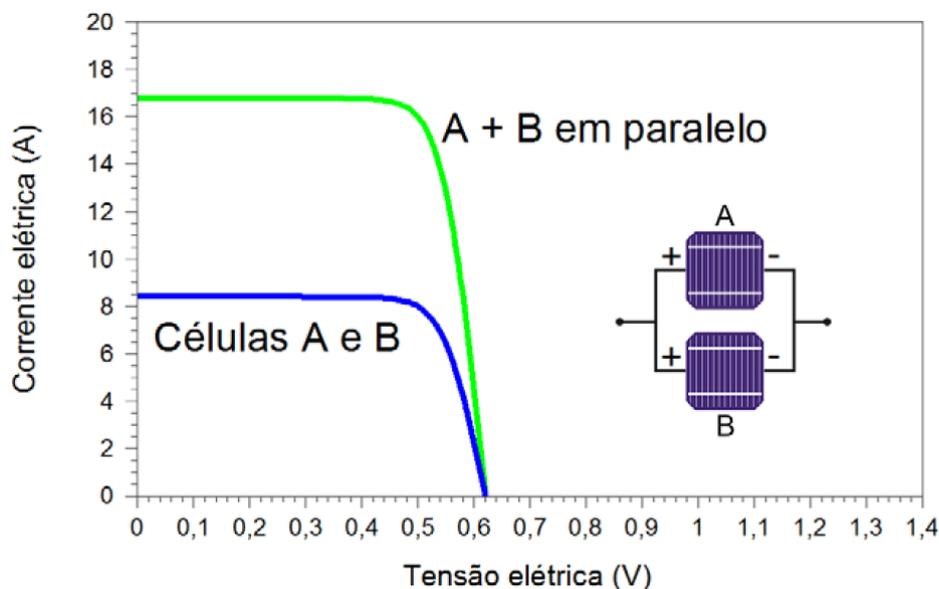


Figura 2.12 – Curva característica de uma associação em paralelo.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

### 2.2.5 Fatores externos que afetam a eficiência

Como foi dito anteriormente, o efeito fotovoltaico é oriundo da interação dos fótons da radiação solar sobre a superfície de um material semicondutor. A incidência desta energia sobre os elétrons livres do material tipo n e das lacunas do material tipo p produz uma corrente elétrica na célula fotovoltaica, logo, o nível de irradiância sobre o dispositivo fotovoltaico influenciará no nível de corrente gerado por esse dispositivo. Quanto maior é a irradiância, maior será a corrente gerada e vice-versa.

Por ser constituído de material semicondutor, os dispositivos de transformação de energia solar em elétrica são afetados também pela temperatura ambiente ao qual estão inseridos. Quanto maior é a temperatura, menor será a tensão gerada por este componente. No entanto é necessário lembrar que o aumento significativo da irradiância solar acarreta também o aumento da temperatura da superfície coletora dos raios solares. Quando comparado os efeitos resultantes do aumento da

irradiância, observa-se que a diminuição da tensão em função do aumento da temperatura é mais significativa que o aumento da corrente em função do aumento da irradiância. Um aumento de  $100^{\circ}\text{C}$  na temperatura produz uma variação da ordem de  $-0,2\text{ V}$  ( $-30\%$ ) em  $V_{OC}$  e de  $+0,2\%$  em  $I_{SC}$  (CEPEL, 2014). A Figura 2.13 apresenta a curva I-V sob a influência da irradiância (2.13a) e da temperatura (2.13b).

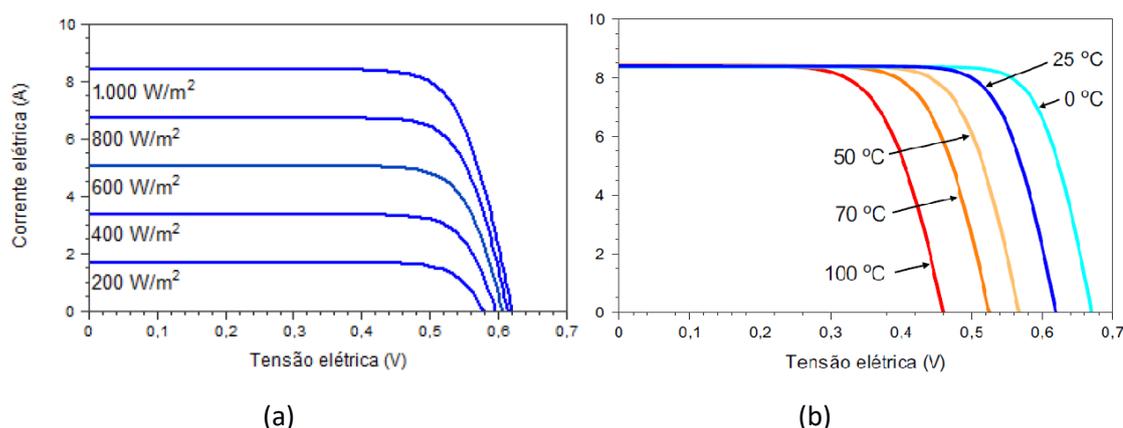


Figura 2.13 – Influência da irradiância solar (a) e da temperatura (b) sobre a tensão e corrente gerados.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

### 2.3 Componentes de um Gerador Fotovoltaico Conectado à Rede

Um gerador fotovoltaico é o sistema que possui todos os componentes e dispositivos necessários para transformar a energia provinda da irradiância solar em energia elétrica com todos os parâmetros ajustados para a injeção desta energia na rede de distribuição elétrica. Este SFCR é composto por um arranjo de módulos fotovoltaicos, dispostos de maneira a gerar a potência necessária para alimentar a carga, por um inversor *grid-tie*, que é responsável por converter o padrão contínuo da tensão e corrente gerados nos módulos em um padrão alternado puramente senoidal na frequência da rede de distribuição, e dispositivos de proteção CC e CA.

### 2.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico, como descrito anteriormente, é a junção, em associações série e paralelo, de inúmeras células fotovoltaicas. Em aplicações de SFCR esse número pode variar entre 60 e 72 células. Como são compostos de células, os módulos herdam toda a característica elétrica, bem como o comportamento da curva característica I-V e as influências de fatores externos na eficiência dos mesmos.

Um módulo fotovoltaico é identificado pela potência elétrica de pico (Wp). Esta grandeza é determinada dentro de condições padrão de teste, conhecido com STC (*Standard Test Conditions*), com irradiância de 1 kW/m<sup>2</sup>, com AM igual à 1,5 e temperatura da superfície de 25°C. Nota-se que a potência de pico dificilmente será alcançada em aplicações reais devido às grandezas de referência adotadas durante o STC.

A curva I-V de um módulo fotovoltaico é semelhante a de uma célula, porém com grandezas de tensão e corrente maiores devido ao arranjo das células na composição do mesmo. Para levantamento desta curva o módulo é submetido às condições STC e uma fonte de tensão varre de valores negativos de tensão até valores superiores a  $V_{oc}$  e são registrados os valores de tensão e corrente no módulo. A Figura 2.14 apresenta a curva característica de um módulo solar.

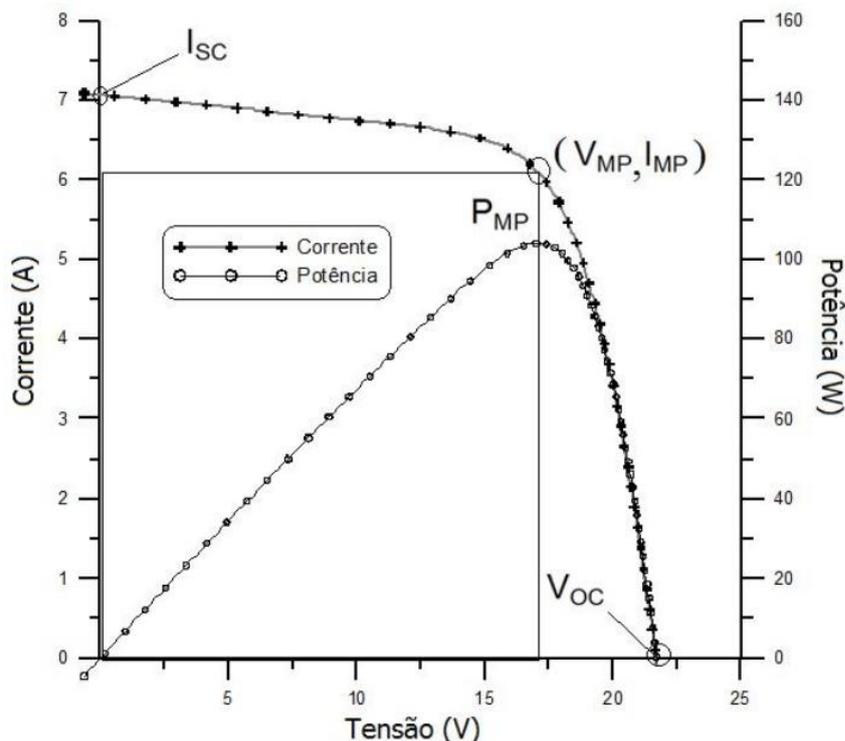


Figura 2.14 – Curva característica de um módulo fotovoltaico.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

Os módulos possuem informações importantes para o projeto de um SFCR. Essas informações técnicas estão normalmente dispostas no *datasheet* do fabricante de cada módulo. A Tabela do Anexo I apresenta cada uma dessas informações e descreve o significado e a importância de cada.

Neste trabalho foi utilizado módulo fotovoltaico produzido pela empresa CANADIAN SOLAR que é referência e líder mundial de vendas de módulos fotovoltaicos para aplicações conectadas à rede elétrica. O modelo utilizado foi um modelo padrão de 60 células e potência de pico de 260 Wp. A Tabela 2.1 apresenta os dados elétricos sob as condições STC retirada do *datasheet* do módulo. A Figura 2.15 mostra o módulo utilizado.

Tabela 2.2 – Dados elétricos do módulo CANADIAN 60 células sob condições STC.

<b>CS6K</b>	<b>275M</b>	<b>280M</b>	<b>285M</b>
Potência nominal máxima (Pmax)	275 W	280 W	285 W
Tensão de máxima potência (Vmp)	31,3 V	31,5 V	31,7 V
Corrente de máxima potência (Imp)	8,80 A	8,89 A	8,98 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	38,3 V	38,5 V	38,6 V
Corrente de curto circuito (Isc)	9,31 A	9,43 A	9,51 A
Eficiência	16,8%	17,11%	17,41%
Temperatura de operação	-40°C ~ +85°C		
Tensão máxima de sistema	1000 V (IEC) ou 1000V (UL)		
Corrente máxima de módulos em série	15 A		
Classificação de aplicação	Classe A		
Potência de tolerância	0 ~ + 5W		

Fonte: Retirado de CANADIAN SOLAR, 2017.

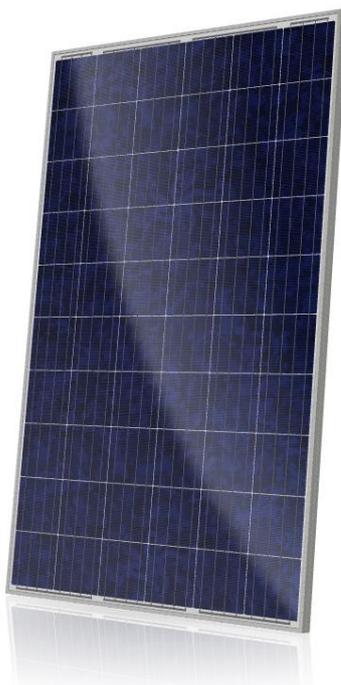


Figura 2.15 – Módulo fotovoltaico 60 células CANADIAN SOLAR.

Fonte: Retirado de CANADIAN SOLAR, 2017.

### 2.3.2 Inversor *Grid-Tie*

Os inversores são dispositivos eletrônicos de potência que convertem uma fonte de tensão contínua em uma fonte de tensão alternada. A fonte de corrente contínua, no caso de um SFCR, é o próprio arranjo de módulos do gerador fotovoltaico. A forma de onda da tensão alternada deverá possuir parâmetros que se adequem à carga a ser alimentada, como por exemplo tensão eficaz, frequência e distorção harmônica total (DHT).

Em aplicações SFCR os parâmetros CA devem ser sincronizados com os parâmetros da rede de distribuição da concessionária de energia responsável. Neste tipo de aplicação é necessário a utilização de um inversor especial conhecido como inversor solar ou inversor *grid-tie*. Estes modelos possuem a capacidade de sincronização com a rede de energia da distribuidora. A partir de sensores, que coletam os dados de tensão e frequência da rede, este equipamento condiciona a conversão de modo que a tensão CA gerada por ele esteja dentro dos limites máximos de desvio em relação à tensão da concessionária.

Estes inversores são encontrados em configuração monofásica, que geralmente são utilizados em potências de até 5 kW, e em configuração trifásica, para potências maiores, ou em bancos de inversores monofásicos.

Os inversores utilizam chaves eletrônicas estáticas e são possíveis a partir da evolução da eletrônica de potência, que nos últimos anos evoluiu a tecnologia empregada na fabricação dos componentes semicondutores e na topologia utilizada nos circuitos de potência e controle. No princípio, os inversores solares eram meras adaptações de circuitos eletrônicos já existentes, mas atualmente os projetos são desenvolvidos levando em conta toda a complexidade de suas aplicações, principalmente quando é considerado o sistema de sincronização com a rede elétrica. A partir desta evolução houve a otimização dos circuitos, a diminuição da emissão de harmônicos e produção de uma eficiência na conversão de até 99%, acarretando uma diminuição nos custos de produção (CEPEL, 2014).

Os componentes atualmente utilizados no chaveamento de inversores são os IGBTs e os MOSFETS, que são escolhidos a partir da frequência de chaveamento e dos níveis de tensão e potência. Nestes circuitos, esses componentes podem ser chaveados em qualquer momento do ciclo pelo sistema de controle, configurando-se em um inversor autocomutado. Através do controle PWM (*Pulse Width Modulation*) obtém-se uma forma de onda da tensão bem próxima da senoidal, que é a forma de onda da tensão da rede (CEPEL, 2014).

Os inversores autocomutados podem funcionar como fontes de corrente ou tensão e possuem como variável de referência a corrente ou tensão de saída, porém, nas aplicações de SFCR, os fabricantes optam por inversores tipo fonte de tensão que são controlados pela corrente de referência, garantindo maior estabilidade diante de perturbações e melhor controle do fator de potência.

A Figura 2.16 representa, em diagrama de blocos, o funcionamento de inversor *grid-tie* de dois estágios.

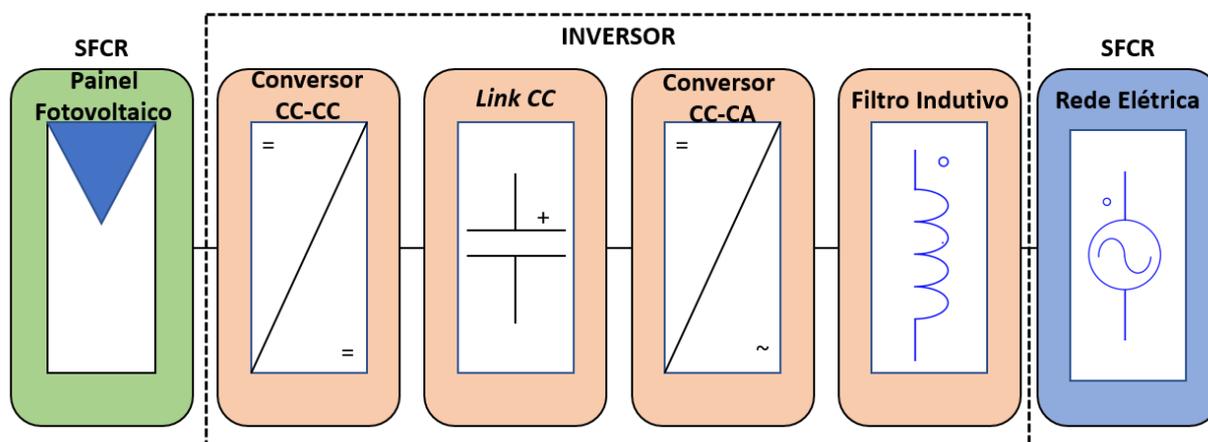


Figura 2.16 – Inversor grid-tie de dois estágios.

Fonte: Do próprio autor.

Denomina-se inversor de dois estágios pois, como pode-se notar na Figura 2.16, há um conversor CC-CC que eleva ou abaixa a tensão, dependendo do arranjo dos módulos, para uma tensão específica no *link* CC. Neste bloco, um capacitor realiza um filtragem da tensão provinda do conversor CC-CC e mantém esta tensão estável. No estágio do conversor CC-CA, a tensão CC é convertida em CA a partir do chaveamento de componentes semicondutores que são controlados por sinais PWM através da corrente de referência. Por último, um indutor é utilizado como filtro passa baixa e como elemento acoplador.

### 2.3.2.1 Características dos inversores

Há vários aspectos que definem a qualidade de um inversor, entre eles, pode-se destacar dois em especial. A forma de onda da tensão de saída indica a qualidade e o custo de um inversor e é dependente do método aplicado no chaveamento e no filtro utilizado para remover as harmônicas de alta frequência. Outro fator é a eficiência na conversão CC-CA que, para os inversores, não possui caráter constante e depende da potência instantânea e também do fator de potência. Normalmente esta grandeza é fornecida sob condições nominais de funcionamento, porém, para cargas parciais os inversores apresentam baixas eficiências.

Os parâmetros a serem especificados normalmente são (CEPEL, 2014):

- **Forma de onda e DHT:** em aplicações de conexão à rede há a necessidade de uma forma de onda puramente senoidal para satisfazer as condições de sincronização com a rede e um THD menor que 5%, para atender as normas de qualidade de energia.
- **Eficiência na conversão de potência:** eficiência é a relação entre a potência de saída e a de entrada, logo, quanto menor é o gasto de potência do inversor para realizar a conversão, maior será a eficiência do mesmo. Considerando-se essa perda de potência constante, à medida que a potência de saída diminui menor será a eficiência.
- **Potência de saída:** é a potência nominal de trabalho do inversor, ou seja, a potência máxima que o inversor supre por longos períodos. Em SFCR a potência do inversor estará relacionada à potência fornecida pelo painel fotovoltaico.
- **Taxa de utilização:** tempo máximo trabalhando em regime nominal (potência nominal).
- **Tensão de entrada:** é a faixa de tensão CC de operação do inversor e deve ser atendida pelos arranjos série/paralelo dos módulos no painel fotovoltaico.
- **Tensão de saída:** é a tensão CA de saída do inversor. No Brasil esse valor varia entre 127V ou 220V monofásico e 220V ou 380V trifásico, dependendo da região do país. Para contornar incompatibilidade nas tensões pode-se utilizar transformadores para acoplamento.
- **Frequência da tensão de saída:** representa a frequência da tensão CA fornecida pelo inversor, no caso de conexão à rede, no Brasil, essa frequência tem valor de 60 Hz e limite de variação de 59,9 Hz à 60,1 Hz de acordo com o PRODIST.
- **Consumo em *standby*:** é a quantidade de energia consumida pelo inversor quando não há carga conectada a ele. Normalmente há um circuito que monitora a saída do inversor para detecção de carga. Quando não há carga a ser alimentada, o inversor começa a operar em regime *standby* e diminui o consumo para melhorar a eficiência.
- **Compatibilidade Eletromagnética:** o funcionamento por chaveamento em alta frequência torna o inversor um vilão, podendo causar interferência em

equipamentos eletrônicos, principalmente nos de telecomunicações. Inversores que possuem o selo CE mantêm, através de filtros e blindagem, os níveis de interferência eletromagnética abaixo dos níveis máximos estabelecidos por normas europeias de EMC.

- **Grau de Proteção:** o IP (*Ingress Protection*) classifica o equipamento quanto a proteção de contatos energizados, proteção contra contatos móveis no interior, proteção contra corpos estranhos, proteção contra entrada de poeira e proteção contra contatos acidentais com água. O IP recomendado para inversores instalados em locais abrigados é de IP20 ou maior, e para locais desabrigados a partir de IP54.
- **Proteções elétricas:** as principais proteções disponíveis por esses componentes são: sobretensão de entrada, no qual, para evitar a danificação o próprio inversor se desconecta do barramento de entrada. Inversão de polaridade cc, que evita que componentes internos sejam danificados e indica a inversão de polaridade ao usuário. Curto circuito CA, neste caso o inversor se desconecta da carga evitando a circulação de uma corrente de curto circuito.

No Brasil, os inversores SFCR são regulamentados pela Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica – através do módulo 3 da PRODIST no item 5 da seção 3.3, que aborda a proteção contra ilhamento e a exigência de um transformador de acoplamento, dentre outras especificações.

O ilhamento acontece quando há a interrupção de fornecimento de energia por parte da concessionária e o sistema fotovoltaico permanece em funcionamento fornecendo energia à rede de distribuição. Este comportamento é inaceitável devido à possíveis manutenções na rede em que se necessita da desenergização da rede elétrica, tal fenômeno traria riscos à vida dos operários da concessionária. Para contornar esta situação os inversores *grid-tie* devem possuir proteção anti-ilhamento, que causa o desligamento do inversor em caso de falta de energia da rede de distribuição.

Neste trabalho foram utilizados vários tipos de inversores para atenderem diversas potências de trabalho. Basicamente utilizou-se inversores das duas empresas mais renomadas do mundo no quesito inversores *grid-tie*, que são a ABB e a FRONIOUS. A Figura 2.17 apresenta dois modelos de inversores, o FRONIOUS GALVO 3.0-1 e o ABB PVI-6000-TL-OUTD, que são inversores para aplicações de potência próximas a 3 kW e 6 kW, respectivamente.



Figura 2.17 – Inversor FRONIUS (à esquerda) e inversor ABB (à direita).

Fonte: Reirado de ABB e FRONIUS, 2017.

## 2.4 Dimensionamento de um SFCR

Os SFCR devem estar de acordo com a seção 3.7 da PRODIST, que descreve as condições necessárias impostas aos projetos conectados à rede. Este trabalho aborda sistemas de até 100 kW que, de acordo com a seção descrita à cima, não há necessidade de transformador para acoplamento a rede elétrica, o que demandaria uma grande problemática ao *software* desenvolvido.

### 2.4.1 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

Ao se pensar no sistema fotovoltaico é importante entender que ele funciona como um compensador de energia elétrica, ou seja, ele fornecerá energia à rede de acordo com o que for consumido pelo usuário. Portanto, é importante levar em consideração que a forma como a energia elétrica é utilizada depende da estação do

ano, como por exemplo, no verão há um aumento no consumo de energia por parte de ventiladores e ar condicionado devido ao aumento de temperatura. Com isso, deve-se levar em consideração o consumo médio diário anual, que pode ser calculado através da soma das faturas mensais em um ano e dividindo-se este valor pelo número de dias em um ano.

A mesma estratégia deve ser adotada no momento de calcular o HSP, levando-se em consideração a irradiância média diária anual.

A potência do painel fotovoltaico que compõe o sistema solar pode ser calculada através da Equação 2.5.

$$P_{FV} = \frac{(E/TD)}{HSP_{MA}} (Wp) \quad (2.5)$$

Onde:

$P_{FV}$  → potência de pico do painel fotovoltaico (Wp);

$E$  → consumo diário médio anual de energia (Wh/dia);

$HSP_{MA}$  → média diária anual das HSP incidente sobre o local (h);

$TD$  → taxa de desempenho.

A taxa de desempenho determina a relação entre o desempenho real do sistema e o desempenho máximo teórico possível. Nesse parâmetro, todas as condições reais são contempladas, tais como, potência real do sistema, perdas ôhmicas, sujeiras sobre o painel, sombreamento, eficiência do inversor, carregamento do inversor, descasamento entre módulos e outras perdas. Um estudo entre vários SFCRs sugere que o valor TD tem uma tendência média entre 70% e 80%.

#### 2.4.2 Dimensionamento do inversor

O inversor deve ser dimensionado em função do gerador fotovoltaico, pois ele suportará toda a potência do sistema. Com a finalidade de otimizar a utilização do inversor, desenvolveu-se um fator de dimensionamento de inversores (FDI) que tem a intenção de utilizar o inversor cuja potência ofereça o melhor custo benefício (CEPEL, 2014).

Como os raios solares não incidem com constância sobre a superfície da terra durante todo o dia, o gerador fotovoltaico não produzirá a potência nominal o dia todo. Visando isso, o inversor escolhido não deve trabalhar em potências baixas por muito tempo e nem em sobre carga por muito tempo, portanto, pode-se utilizar um inversor de menor potência que acarreta numa diminuição do custo final.

O FDI pode ser calculado pela Equação 2.6 e relaciona a potência do gerador fotovoltaico e do inversor, este parâmetro pode-se variar entre 75% a 105% de acordo com a literatura (CEPEL, 2014).

$$FDI = \frac{P_{Nca} (W)}{P_{FV} (Wp)} \quad (2.6)$$

Onde:

$P_{Nca}$  → potência nominal do inversor;

$P_{FV}$  → potência de pico do painel fotovoltaico;

### 2.4.3 Arranjo série/paralelo dos módulos fotovoltaicos

O arranjo série/paralelo será dimensionado em função do inversor selecionado. Normalmente os inversores apresentam faixas de valores de tensão e corrente de operação, essa faixa é utilizada para dimensionar o número de módulos em série em cada fileira, denominada *string*, e o número de *strings* possíveis do arranjo. Basicamente, a faixa de valores da tensão de entrada delimita a quantidade de módulos em série e a faixa de valores da corrente de entrada delimita a quantidade de fileiras em paralelo.

Ao observar o *datasheet* do inversor pode-se notar que há a faixa de valores de tensão cujo seguidor de ponto de potência máxima (SPPM) consegue trabalhar. A Figura 2.18 ilustra essa faixa de valores. Deve-se então, calcular o número de módulos em série de modo que a tensão resultante dos mesmos esteja dentro da faixa de operação do SPPM. Outro cuidado importante a ser tomado é que, quando não há cargas sendo alimentadas, a tensão dos módulos é a máxima, ou seja,  $V_{oc}$  e a tensão

total de circuito aberta não deve ser maior que a tensão máxima de entrada do inversor. As Equações 2.7 e 2.8 mostram como é calculado o número de módulos em série.

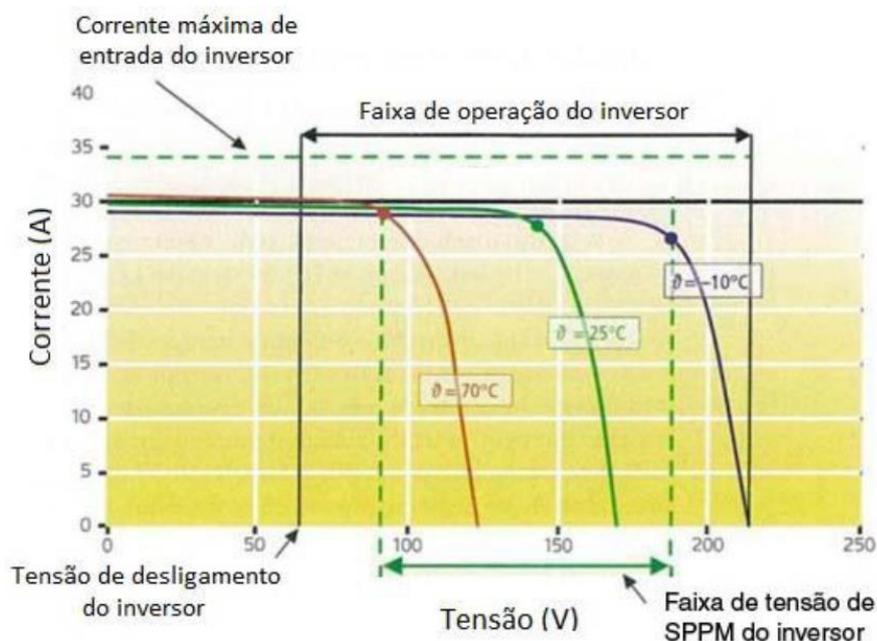


Figura 2.18 – Faixa de operação do inversor e do SPPM.

Fonte: Retirado de CEPEL, 2014.

$$N^{\circ} \text{módulos em série} \times V_{OC} < V_{i \max} \quad (2.7)$$

$$V_{SPPM \min} < N^{\circ} \text{módulos em série} \times V_{\text{nominal}} < V_{SPPM \max} \quad (2.8)$$

Onde:

$V_{OC}$  → tensão de circuito aberto do módulo;

$V_{i \max}$  → máxima tensão de entrada do inversor;

$V_{SPPM \min}$  → mínima tensão de entrada do SPPM;

$V_{SPPM \max}$  → máxima tensão de entrada do SPPM.

Para o cálculo do número de *strings* apenas é considerada a corrente máxima de entrada do inversor e a corrente  $I_{SC}$ , que é a corrente máxima provinda de um módulo. A relação entre o número de *strings* e a corrente de curto circuito não deve

ser maior que a corrente máxima de entrada do inversor, conforme explana a Equação 2.9.

$$N^{\circ}_{strings} = \frac{I_{i\ max}}{I_{SC}} \quad (2.9)$$

Onde:

$I_{i\ max}$  → corrente máxima de entrada do inversor;

$I_{SC}$  → corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico;

### 3 METODOLOGIA

No capítulo anterior foram descritos os passos mais importantes para o dimensionamento de um SFCR, como calcular a potência de pico do gerador fotovoltaico, a potência do inversor a ser utilizado e como deve ser realizado os arranjos série/paralelo dos módulos fotovoltaicos. A partir destes cálculos pode-se facilmente determinar toda a estrutura necessária para a instalação de um sistema solar.

Neste capítulo são estudadas as estratégias adotadas para se desenvolver o programa proposto, as variáveis de entrada e os dados de saída escolhidos para desenvolver um *software* de fácil utilização.

#### 3.1 Dados de Entrada

O Capítulo 2.4 trata do dimensionamento de um SFCR e nota-se que os dimensionamentos de inversor e arranjo série/paralelo são em função da potência do painel fotovoltaico, portanto, os dados de entrada são relacionados à Equação 2.5.

Analisando-se a Equação 2.5 pode-se retirar os dados de entrada necessários para dimensionar um gerador fotovoltaico, estes dados são:

- **Consumo de energia:** o consumo de energia determinará a quantidade de energia a ser compensada pelo painel fotovoltaico. Esta variável deve ser dada em energia média diária anual (Wh/dia).
- **Irradiância solar:** a irradiância determina a energia disponibilizada no local pelo Sol. Esta grandeza é disponibilizada em função de horas de sol pleno (HSP).

Outra variável adotada foi o preço pago pelo kWh. Essa variável não influencia no dimensionamento do sistema, mas é de suma importância para a realização do estudo de viabilidade econômica do sistema, onde é comparado o custo gasto em energia solar sem o sistema de compensação e o custo gasto em energia com a utilização do sistema solar.

### 3.1.1 Consumo de energia elétrica

Como foi discutido anteriormente, o consumo de energia elétrica não é constante ao longo de um ano. Há diferentes consumos médios diários ao longo de cada estação e isso se justifica pela utilização de equipamentos elétricos para conforto humano, como por exemplo, a utilização de ventiladores e ares-condicionados para resfriamento durante o verão. Desse modo, para a realização de um projeto que compense toda a energia gasta durante o ano, é necessário utilizar este dado com base média diária anual.

A partir da fatura de energia elétrica do imóvel que será compensado pela instalação de um SFCR, é possível obter este dado de maneira rápida e simples. A Figura 3.1 ilustra o histórico de consumo disponível em conta de energia da empresa CEMIG. Nota-se que para cada mês há o consumo médio diário em kWh/dia.

Mês/Ano	Consumo KWh	Média kWh/Dia	Dias de Faturamento
FEV/09	230	7,42	31
JAN/09	245	7,66	32
DEZ/08	337	12,04	28
NOV/08	370	11,21	33
OUT/08	293	9,77	30
SET/08	255	8,79	29
AGO/08	290	9,06	32
JUL/08	299	9,97	30
JUN/08	317	10,93	29
MAI/08	320	9,70	33
ABR/08	269	8,97	30
MAR/08	278	9,27	30
FEV/08	213	7,34	29

Figura 3.1 – Histórico de consumo de uma conta de energia elétrica.

Fonte: Do próprio autor.

Para se calcular a média diária anual basta realizar a média da coluna “Média kWh/Dia” somando-se todos os valores e dividindo pelo total de 13 meses, pois nas faturas sempre se repete o mês de cobrança.

### 3.1.2 Irradiância Solar

Há vários *softwares* profissionais que dispõem de dados extremamente exatos da irradiância solar média em função da localização geográfica. Como o *software* desenvolvido neste trabalho tem o intuito apenas de auxiliar um profissional no dimensionamento, os dados de irradiância foram baseados no SunData.

O SunData é um programa baseado no banco de dados de *Valores Médios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal de Estudios de la Energia Solar* (CENSOLAR, 1993) que possui os dados de irradiância em cerca de 350 pontos no Brasil. O SunData destina-se ao cálculo da irradiância diária média mensal em qualquer ponto do território brasileiro a partir do banco de dados da CESOLAR. O SunData foi desenvolvido pelo CRESESB – Centro de Referência Solar para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – com o intuito de oferecer uma ferramenta de apoio ao

dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Mais informações sobre o SunData podem ser encontradas em seu *site* “[www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)”.

Neste trabalho, com o intuito de facilitar a entrada de dados e diminuir a complexidade final do *software*, foi calculada a média diária anual de HSP para cada região do Brasil, ou seja, no momento de entrada de dados o usuário deve apenas escolher a região onde será instalado o SFCR. Esta aproximação se justifica, pois a pequena diferença que se possui entre o dado médio e real é compensado pelo TD (taxa de desempenho) que sempre permitirá um dimensionamento de um sistema que gere a energia necessária para a compensação completa de energia.

A Tabela 3.1 apresenta os valores de HSP calculados para cada região brasileira a partir dos dados disponíveis pelo SunData. Os valores dispostos nesta tabela mostram a quantidade de HSP médio diário para um ano meteorológico típico abrangendo todas as estações do ano.

Tabela 3.1 – HSP de cada região brasileira.

<b>Região</b>	<b>HSP (h)</b>
Nordeste	4,82
Norte	5,34
Centro-Oeste	4,98
Sul	4,22
Suldeste	4,44

### 3.2 Dados de Saída

Quando se projeta um sistema elétrico, seja ele qual for, espera-se que no final haja pelo menos dois tipos de documentos. Um deles é a relação de componentes ou material a serem utilizados na implementação deste projeto e o outro é o diagrama unifilar de ligação elétrica. Pensando nisto, o *software* desenvolvido apresenta, após os cálculos realizados com os dados de entrada, a relação de materiais utilizados e o preço de cada componente, o diagrama unifilar de ligação de cada componente que apresenta também o arranjo série/paralelo do gerador fotovoltaico, e um estudo de

viabilidade econômica, onde um gráfico compara o gasto de um consumidor sem geração de energia elétrica com outro que possui a tecnologia no período de tempo de garantia do sistema, que normalmente é de 25 anos.

Abaixo apresenta-se detalhadamente cada um dos dados de saída:

**Lista de materiais:** na lista de materiais é apresentado o valor de potência do sistema solar fotovoltaico dimensionado, a quantidade de painéis CANADIAN 60 células, a marca e modelo do inversor adotado e outros componentes como uma stringbox que é a proteção CC do sistema, um kit de estrutura metálica para instalação em telhados de chapa metálica. Para cada componente apresenta-se o seu valor e também o valor total do kit gerador solar.

**Diagrama unifilar:** a partir do sistema calculado o software apresenta um diagrama elétrico unifilar que apresenta o arranjo do número de módulos em série e a quantidade de strings necessárias para o sistema calculado. No diagrama é disponibilizado a ordem de ligação do painel fotovoltaico, da stringbox, do inversor e do quadro de medição do imóvel ao qual será instalado o sistema.

**Viabilidade econômica simplificada:** com base no preço pago no kWh, fornecido pelo usuário como dado de entrada, e no preço do sistema completo calculado no item “Lista de materiais” é realizado um estudo de viabilidade econômica. Neste estudo é comparado o preço gasto em energia elétrica durante 25 anos, que é a duração da garantia dos módulos solares, entre quem não utiliza a energia solar e quem opta por adquiri-la. No primeiro cálculo é utilizado uma inflação energética de 7% ao ano e no segundo cálculo é utilizado uma taxa de 50% sobre o preço do material para simular o valor de projeto e instalação do sistema.

### 3.3 Estratégias utilizadas

Após explicados os dados de entrada e saída será explanado as etapas de dimensionamento realizadas pelo software desenvolvido. A Figura 3.2 apresenta o fluxograma de funcionamento do programa.

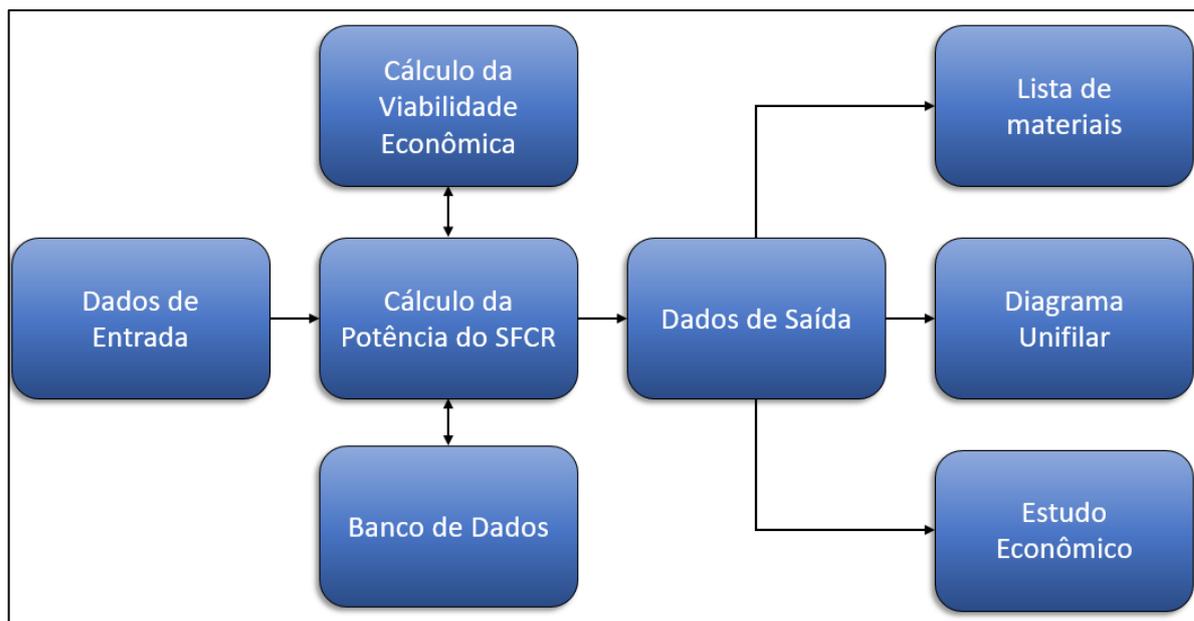


Figura 3.2 – Fluxograma do *software* proposto.

Fonte: Do próprio autor.

Analisando-se a Figura 3.2 é possível entender o funcionamento da ferramenta computacional desenvolvida. A partir dos dados de entrada, discutidos anteriormente, o programa realiza o cálculo da potência do SFCR baseando-se na Equação 2.5. Neste trabalho foi adotado um TD igual a 70%, justifica-se pois quanto menor é o TD maior será a potência calculada, eliminando-se possíveis erros pela aproximação do HSP adotado. Após o cálculo da potência do gerador fotovoltaico, o software consulta um banco de dados que foi desenvolvido baseado em catálogo da empresa SICES Brasil. O catálogo utilizado para desenvolvimento do banco de dados é o referente ao mês de agosto do ano de 2016, neste catálogo é apresentado vários kits de geradores solares com os componentes necessários e o preço referente a cada item. Após a escolha de qual sistema será utilizado é realizado o cálculo de viabilidade econômica. Ao final, o programa é capaz de apresentar o dados de saída expostos em pdf (lista de materiais e diagrama unifilar) e em gráfico para análise (estudo econômico).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O *software* desenvolvido foi batizado com o nome de SonneProgram, que é a junção de duas palavras Sonne, do alemão que significa sol, e Program, que é programa em inglês. O SonneProgram foi desenvolvido em JAVA, apresenta uma interface amigável, intuitiva e fácil configuração. Na próxima seção será apresentado o programa em sua versão final.

### 4.1 SonneProgram

#### 4.1.1 Interface para usuário

A Figura 4.1 apresenta a interface desenvolvida. O programa possui apenas duas janelas, a primeira é responsável pelos dados de entrada e a segunda pelos dados de saída.



Figura 4.1 – Interface desenvolvida. (a) Entrada de Dados. (b) Dados de saída.

Fonte: Do próprio autor.

O SonneProgram foi pensado de forma a facilitar o dimensionamento de um SFCR, por isso possui simplicidade na entrada de dados, na configuração do programa e na coleta dos dados. Com isso o usuário, que é um profissional do ramo, ganha rapidez e independência utilizando este *software*.

#### 4.1.2 Dados de saída

Para exemplificar e demonstrar como são expostos os dados de saída, utilizou-se os dados da Figura 3.1. Observando-se a Figura 4.1(a) nota-se que o dado de consumo de energia é dado pelo consumo total anual em kWh, logo, a fatura da Figura 3.1 possui um consumo total de 3503 kWh. Para os demais dados foi adotado a região sudeste e o preço do kWh o mesmo cobrado pela CEMIG, que atualmente é R\$ 0,81300888. Com a inserção destes dados têm-se os seguintes resultados dispostos nas figuras a seguir.



# Sonne Program

## Lista de Componentes Sistema Fotovoltaico

### Potência 3,18 kWp

Sistema Fotovoltaico de 3,18 kWp - Inversor Fronious 3.0-1

Item	Quantidade	Preço Unitário	Preço Lote
<i>Painel Solar Canadian 60 Células 265 W</i>	12	R\$ 779,28	R\$ 9.351,36
<i>Inversor Fronious Galvo 3.0-1</i>	1	R\$ 5.840,60	R\$ 5.840,60
<i>String Box Onesto - 1/2</i>	1	R\$ 663,52	R\$ 663,52
<i>Kit Estrutura Metálica K2 System</i>	1	R\$ 1.412,53	R\$ 1.412,53
<i>Cabo Solar 6MM&lt;1000V</i>	40	R\$ 4,74	R\$ 189,60
<i>Conectores Fêmea/Macho MC4</i>	2	R\$ 23,54	R\$ 47,08
<i>Total</i>			R\$ 17.504,69

Figura 4.2 – Lista de materiais para exemplo da Figura 3.1.

Fonte: Do próprio autor.

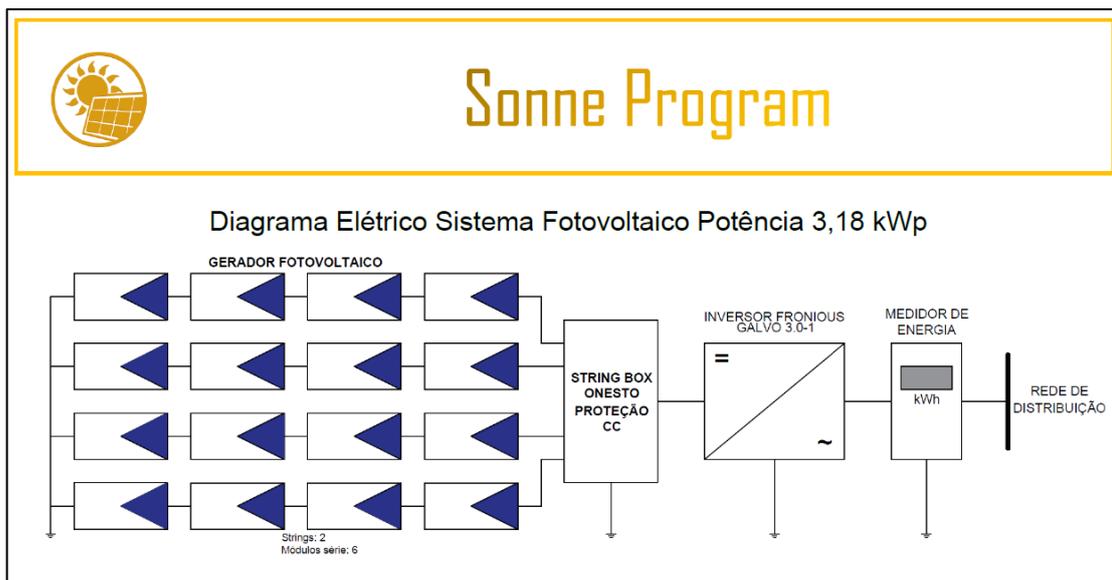


Figura 4.3 – Diagrama elétrico unifilar para exemplo da Figura 3.1.

Fonte: Do próprio autor.

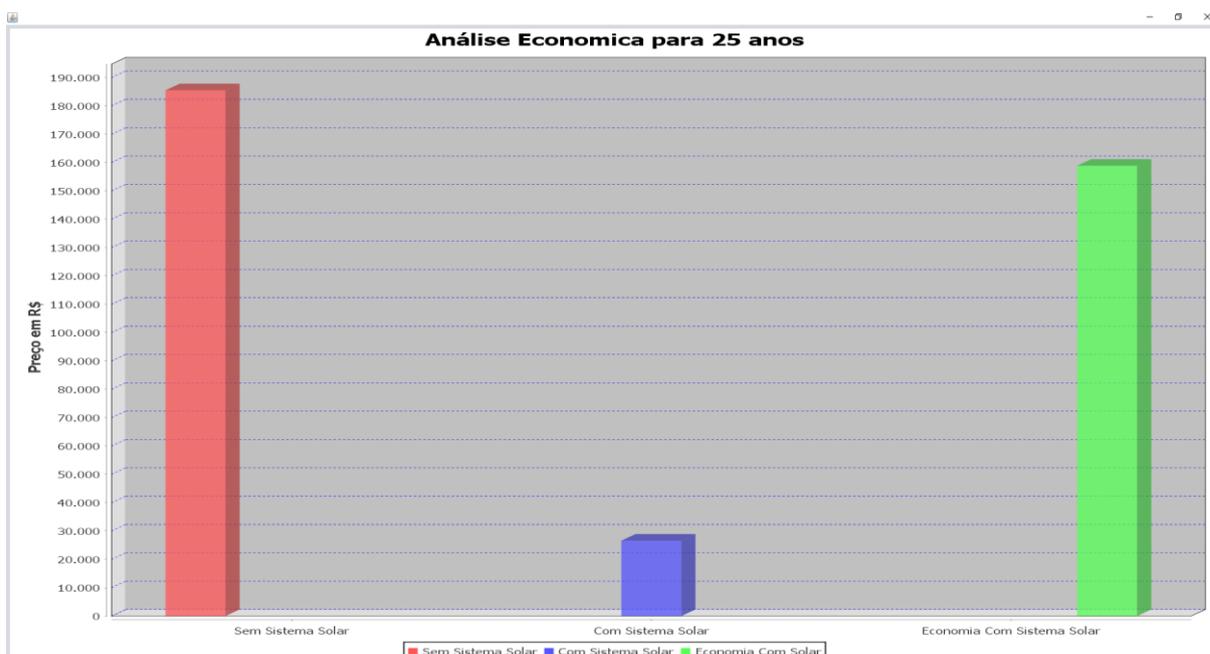


Figura 4.4 – Análise Econômica para exemplo da Figura 3.1.

Fonte: Do próprio autor.

Nota-se que o sistema proposto possui potência de pico no valor de 3,18 kWp, para este sistema será utilizado 12 módulos CANADIAN de 60 células disposto em duas strings com 6 módulos cada, ligados a stringbox ONESTO para proteção CC do painel

fotovoltaico. Após a ligação à caixa de proteção CC, o sistema é ligado ao inversor FRONIOUS GALVO 3.0-1 que é então conectado ao quadro de medição do imóvel. A Figura 4.4 apresenta o consumo de energia elétrica sem compensação por sistema solar ao longo de 25 anos. Com uma inflação energética adotada de 7%, o valor calculado chegou a R\$ 185.485,98 (barra em vermelho). Com o SFCR o custo cairia para R\$ 26.607,13 (barra em azul) que é o valor do material acrescido de 50% para simular o gasto com projeto e instalação do sistema. A barra em verde representa a economia total pela instalação do sistema solar, neste exemplo o valor chegou a R\$ 158.878,86.

### 4.3 Estudos de caso

Nesta seção são apresentados alguns projetos dimensionados utilizando o SonneProgram a partir de contas de energia reais de diferentes tipos de consumidores de energia elétrica. Para validação do *software* desenvolvido, os mesmos casos foram dimensionados por uma planilha Excel utilizada pela empresa KZ Engenharia. Os resultados apresentados a seguir demonstram os dados de saída gerados pelo SonneProgram e pela planilha utilizada pela KZ Engenharia.

No Anexo II esta disposta a folha de entrada de dados utilizados pela planilha a fim de comparar e comprovar o quão simples, rápido e fácil é a utilização do SonneProgram em comparação com os métodos usados atualmente.

#### 4.3.1 Residência Comum

A Tabela 3.2 apresenta o histórico de consumo de uma residência comum com 3 habitantes.

Tabela 4.1 – Histórico de consumo residência.

Mês/Ano	Consumo kWh
jan/17	147
dez/16	153
nov/16	187
out/16	181
set/16	155

Mês/Ano	Consumo kWh
ago/16	177
jul/16	133
jun/16	177
mai/16	147
abr/16	168
mar/16	122
fev/16	145

A residência, cujo histórico de consumo acima pertence, esta situada na cidade de Piumhi-MG e por tanto esta na região sudeste e abastecida pela concessionária de energia CEMIG que possui preço do kWh de R\$ 0,81300888. A partir destes dados é encontrado o seguinte sistema.



## Sonne Program

### Lista de Componentes Sistema Fotovoltaico

#### Potência 1,59 kWp

*Sistema Fotovoltaico de 1,59 kWp - Inversor Fronious 1.5-1*

Item	Quantidade	Preço Unitário	Preço Lote
<i>Painel Solar Canadian 60 Células 265 W</i>	6	R\$ 779,28	R\$ 4.675,68
<i>Inversor Fronious Galvo 1.5-1</i>	1	R\$ 4.716,48	R\$ 4.716,48
<i>String Box Onesto - 1/2</i>	1	R\$ 663,52	R\$ 663,52
<i>Kit Estrutura Metálica K2 System</i>	1	R\$ 720,47	R\$ 720,47
<i>Cabo Solar 6MM&lt;1000V</i>	40	R\$ 4,74	R\$ 189,60
<i>Conectores Fêmea/Macho MC4</i>	2	R\$ 23,54	R\$ 47,08
<i>Total</i>			R\$ 11.012,83

Figura 4.5 – Lista de materiais para residência comum.

Fonte: Do próprio autor.

Nota-se que este sistema é bem menor que o apresentado no exemplo da seção 4.1.2. Este possui apenas 6 módulos CANADIAN 60 células, um inversor FRONIOUS GALVO 1.5-1 e os módulos se dispõem apenas em uma *string* sendo todos ligados em série. O esquema de ligação elétrica é análogo ao explicado anteriormente. O estudo econômico ilustrado na Figura 4.7 permite observar que o custo de energia para uma residência com consumo equivalente ao da Tabela 3.2 que não possui compensação é de R\$ 100.182,56, enquanto para uma residência que possui a compensação o valor resume-se em R\$ 16.739,50, adotando-se os mesmos 50% sobre o valor do material. Observa-se que neste caso a economia é de um total de R\$ 83.443,06.

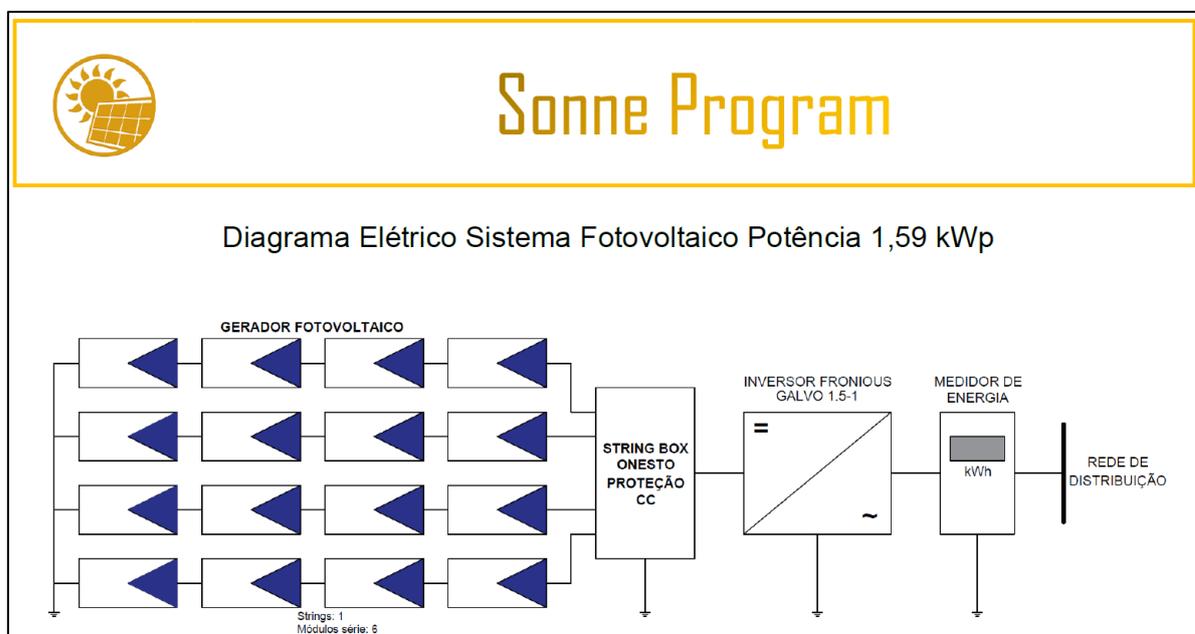


Figura 4.6 – Diagrama elétrico unifilar para residência comum.

Fonte: Do próprio autor.

Para a planilha de cálculos de SFCR utilizado pela KZ Engenharia o sistema fotovoltaico dimensionado foi de 1,6 kWp, utilizando 6 módulos fotovoltaicos e um inversor BB Power 1,6 kW. A Figura 4.8 ilustra os dados gerados pelo sistema.

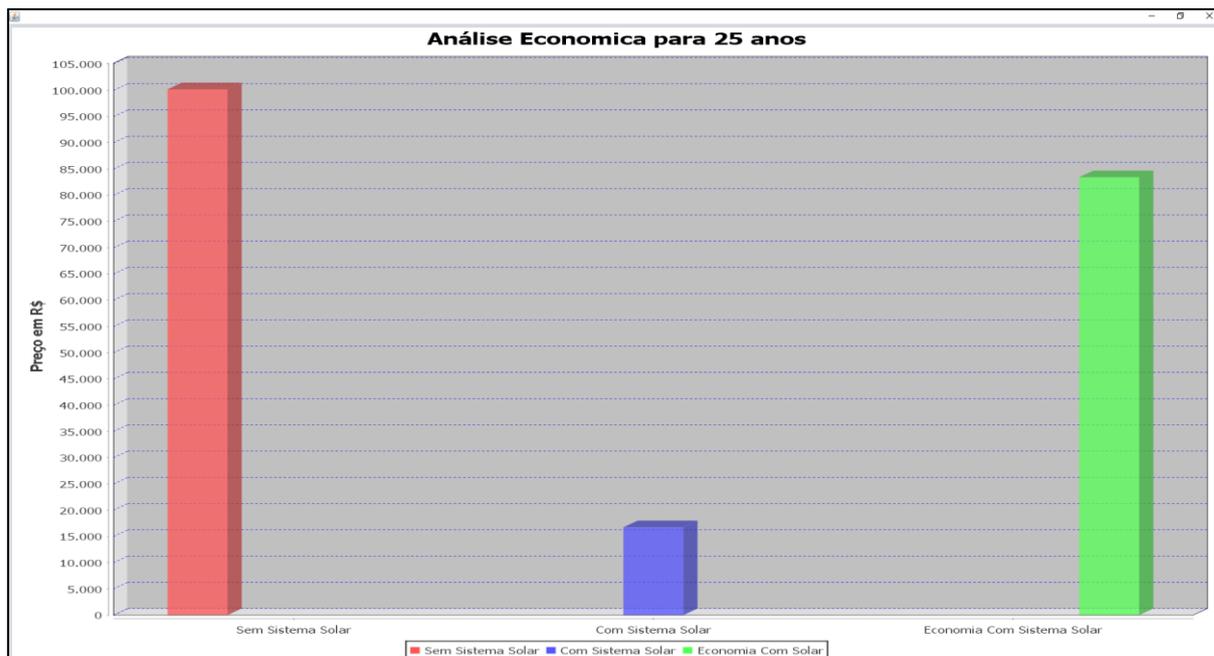


Figura 4.7 – Análise Econômica para residência comum.

Fonte: Do próprio autor.

RENOVIGI - RESUMO DO PROJETO	
<b>DADOS DA INSTALAÇÃO</b>	
Cidade	Formiga
Estado	MG
Ligação Monofásica/Bifásica/Trifásica (M, B ou T?)	B
% de geração desejado em relação ao consumo médio mensal	100%
Latitude do local (graus)	22
Inclinação dos painéis considerada no projeto (graus)	20
Inclinação percentual dos painéis	34%
Consumo mínimo mensal para o tipo de ligação (kWh/mês)	50
Temperatura Máxima no local	40
Temperatura Mínima no local	12
Média de Horas de Sol Equivalente/dia ao longo do ano	5,6
<b>PAINEL</b>	
Potência de cada painel (W)	270
Quantidade de painéis	6
Estimativa de área para instalação (m2)	11
<b>INVERSOR</b>	
Modelo e Potência do Inversor	INVERSOR BB Power 1.6kW
Quantidade de inversores	6
<b>GERAÇÃO PREVISTA DE ENERGIA</b>	
Potência total do arranjo fotovoltaico	1,62 kW
Energia média mensal gerada pelo sistema	216 kWh/mês
Energia total / ano	2.589 kWh/ano
Energia média mensal gerada por painel	36 kWh/mês

Figura 4.8 – Sistema gerado pela planilha para residência comum.

Fonte: Do próprio autor.

### 4.3.2 Fazenda Cafeeira

A Tabela 3.3 apresenta o histórico de consumo de energia para uma fazenda cafeeira situada no município de Piumhi-MG.

Tabela 4.2 – Histórico de consumo fazenda cafeeira.

Mês/Ano	Consumo kWh
mai/17	120
abr/17	280
mar/17	160
fev/17	160
jan/17	200
dez/16	120
nov/16	240
out/16	760
set/16	1760
ago/16	1240
jul/16	1200
jun/16	440

A Tabela 3.3 revela a importância de se fazer o levantamento do consumo anual, já que nos meses de jul/16 a out/16 o consumo se torna várias vezes maior que a média. Isso explica-se porque neste período é realizado a colheita do café, que passa por um processo de secagem, o qual demanda a utilização de muitos motores no processo. Para consumidores rurais o preço por kWh cobrado pela CEMIG é menor e vale R\$ 0,48370306. As Figuras 4.8 a 4.10 demonstram o sistema calculado pelo SonneProgram.

Como o consumo é maior que o de uma residência comum, o SFCR resultante foi com potência de 6,36 kWp, que utiliza 24 módulos fotovoltaicos CANADIAN 60 células dispostos em 2 *strings* com 12 módulos ligados em série e utiliza um inversor FRONIOUS PRIMO 6.0-1. Caso a fazenda não utilize um sistema solar ela gastará com energia solar nos próximos 25 anos um total de aproximadamente R\$ 210.441,30. Em contrapartida, se optar pela instalação de um SFCR a fazenda economizará um total de R\$ 164.836,1 investindo um valor de R\$ 45.605,17.



## Sonne Program

**Lista de Componentes Sistema Fotovoltaico**  
**Potência 6,36 kWp**

*Sistema Fotovoltaico de 6,36 kWp - Inversor Primo 6.0-1*

Item	Quantidade	Preço Unitário	Preço Lote
Painel Solar Canadian 60 Células 265 W	24	R\$ 749,31	R\$ 17.983,44
Inversor Primo 6.0-1	1	R\$ 8.245,20	R\$ 8.245,20
String Box Onesto - 1/2	1	R\$ 663,52	R\$ 663,52
Kit Estrutura Metálica K2 System	1	R\$ 2.637,88	R\$ 2.637,88
Cabo Solar 6MM<1000V	80	R\$ 4,74	R\$ 379,20
Conectores Fêmea/Macho MC4	4	R\$ 23,54	R\$ 94,16
<i>Total</i>			R\$ 30.003,40

Figura 4.9 – Lista de materiais para fazenda cafeeira.

Fonte: Do próprio autor.

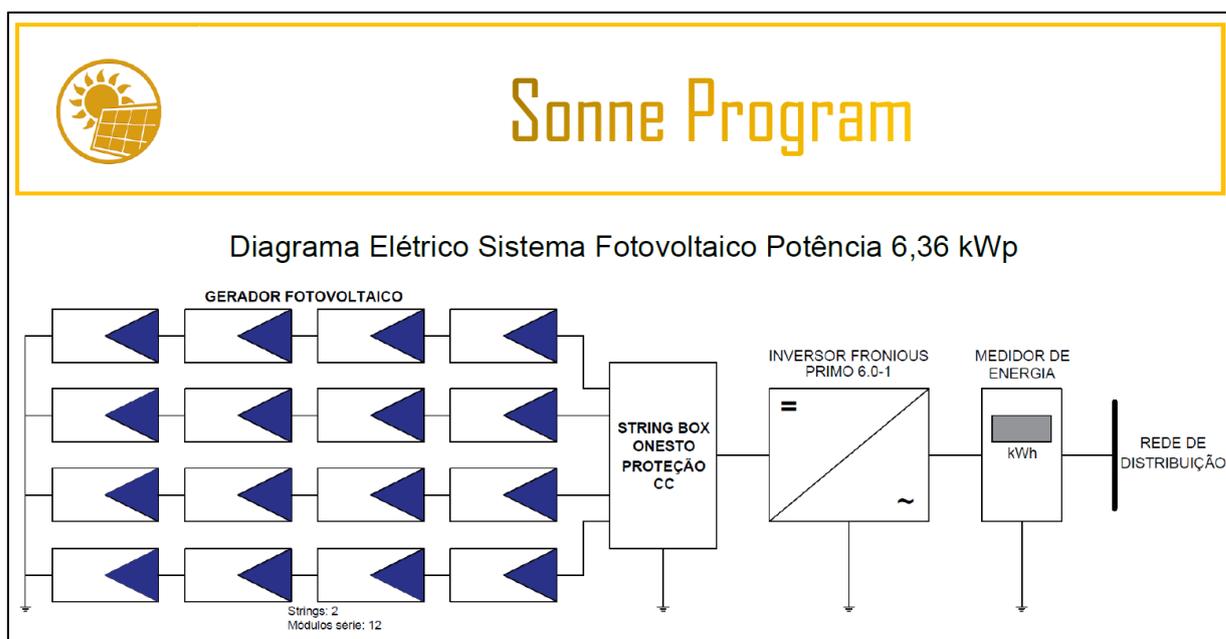


Figura 4.10 – Diagrama elétrico unifilar para fazenda cafeeira.

Fonte: Do próprio autor.

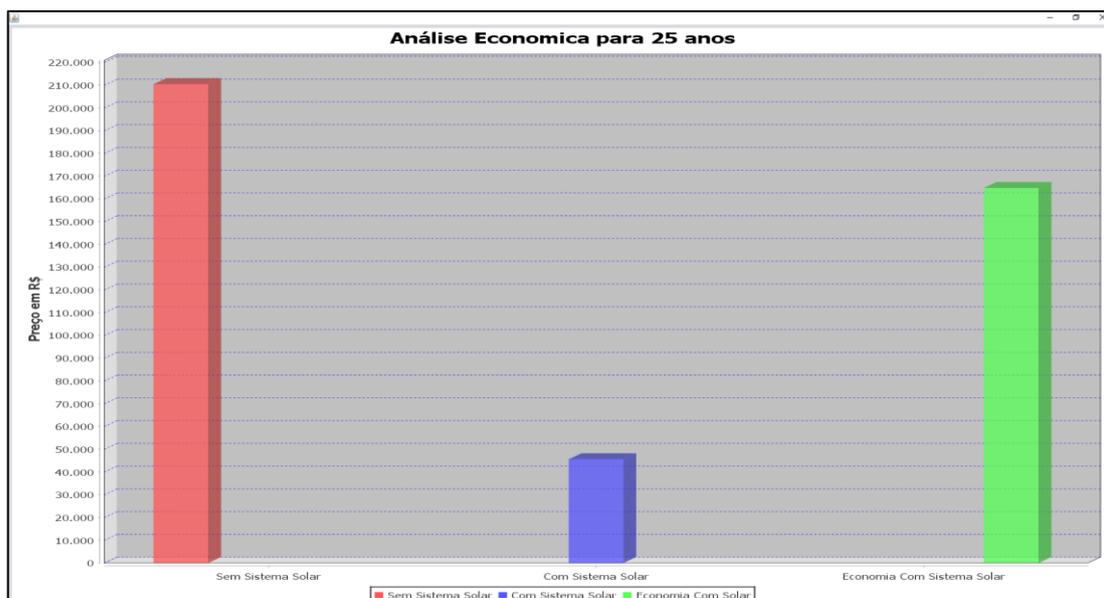


Figura 4.11 – Análise Econômica para fazenda cafeeira.

Fonte: Do próprio autor.

RENOVIGI - RESUMO DO PROJETO	
<b>DADOS DA INSTALAÇÃO</b>	
Cidade	Formiga
Estado	MG
Ligação Monofásica/Bifásica/Trifásica (M, B ou T?)	B
% de geração desejado em relação ao consumo médio mensal	100%
Latitude do local (graus)	22
Inclinação dos painéis considerada no projeto (graus)	20
Inclinação percentual dos painéis	34%
Consumo mínimo mensal para o tipo de ligação (kWh/mês)	50
Temperatura Máxima no local	40
Temperatura Mínima no local	12
Média de Horas de Sol Equivalente/dia ao longo do ano	5,6
<b>PAINEL</b>	
Potência de cada painel (W)	270
Quantidade de painéis	24
Estimativa de área para instalação (m2)	43
<b>INVERSOR</b>	
Modelo e Potência do Inversor	INVERSOR BB Power 5.0kW
Quantidade de inversores	24
<b>GERAÇÃO PREVISTA DE ENERGIA</b>	
Potência total do arranjo fotovoltaico	6,48 kW
Energia média mensal gerada pelo sistema	868 kWh/mês
Energia total / ano	10.410 kWh/ano
Energia média mensal gerada por painel	36 kWh/mês

Figura 4.12 - Sistema gerado pela planilha para fazenda cafeeira.

Fonte: Do próprio autor.

Para a planilha de cálculos de SFCR utilizado pela KZ Engenharia o sistema fotovoltaico dimensionado foi de 6,48 kW<sub>p</sub>, utilizando 24 módulos fotovoltaicos e um inversor BB Power 5,0 kW. A Figura 4.12 ilustra os dados gerados pelo sistema.

### 4.3.3 Fazenda de Búfalos

A Tabela 3.4 apresenta o histórico de consumo de uma fazenda de criação de búfalos para leite, que está situada também na cidade de Piumhi-MG. Os demais dados de entrada são equivalentes ao do estudo da Seção 4.3.2. As Figuras 4.11 a 4.13 ilustram o SFCR calculado pelo SonneProgram.

Tabela 4.3 – Histórico de consumo fazenda de búfalos.

Mês/Ano	Consumo kWh
mai/17	3327
abr/17	3454
mar/17	3427
fev/17	3341
jan/17	2101
dez/16	3283
nov/16	3200
out/16	2484
set/16	3080
ago/16	3014
jul/16	7390
jun/16	2594



## Sonne Program

**Lista de Componentes Sistema Fotovoltaico**  
**Potência 31,8 kWp**

*Sistema Fotovoltaico de 31,8 kWp - Inversor ABB TRIO 27.6 Trifásico 380V*

Item	Quantidade	Preço Unitário	Preço Lote
Painel Solar Canadian 60 Células 265 W	120	R\$ 707,35	R\$ 84.882,00
Inversor ABB TRIO 27.6 Trifásico 380V	1	R\$ 26.224,26	R\$ 26.224,26
String Box Onesto - 4/2	1	R\$ 3.141,82	R\$ 3.141,82
Kit Estrutura Metálica K2 System	1	R\$ 13.032,94	R\$ 13.032,94
Cabo Solar 6MM<1000V	400	R\$ 4,74	R\$ 1.896,00
Conectores Fêmea/Macho MC4	24	R\$ 23,54	R\$ 564,96
Fusível Gpv 1000V 20A	4	R\$ 19,83	R\$ 79,32
<i>Total</i>			R\$ 129.741,98

Figura 4.13 – Lista de materiais para fazenda de búfalos.

Fonte: Do próprio autor.

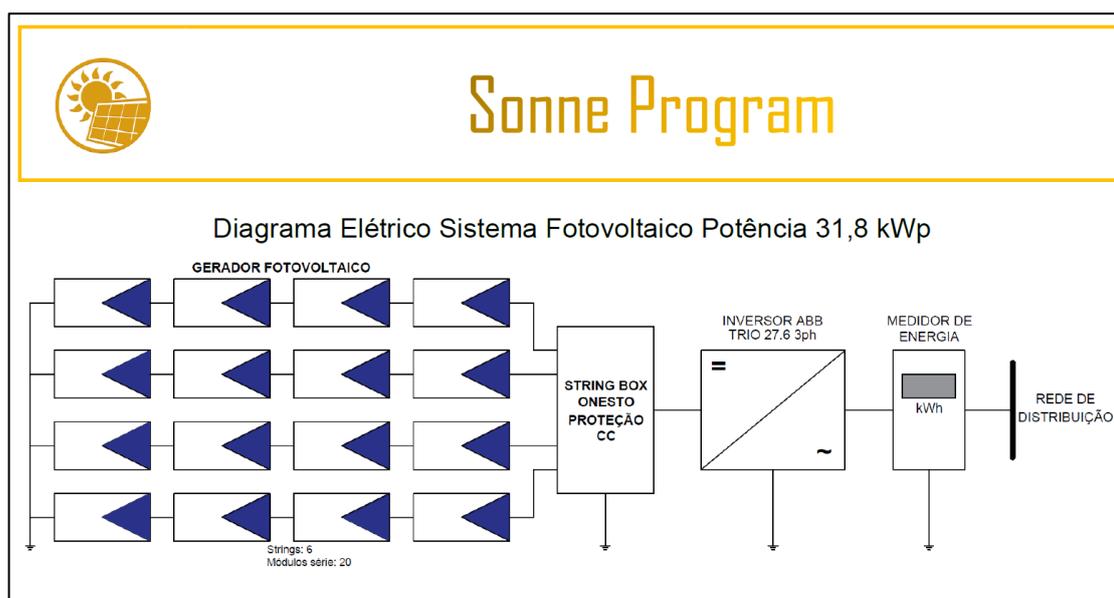


Figura 4.14 – Diagrama elétrico unifilar para fazenda de búfalos.

Fonte: Do próprio autor.

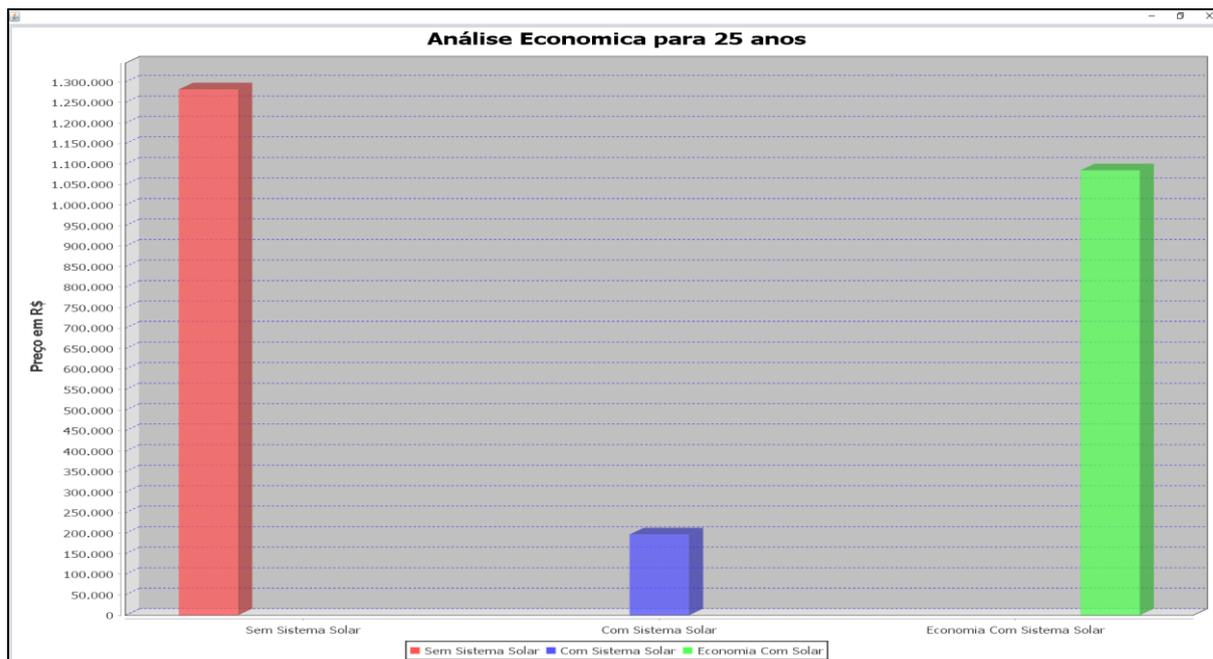


Figura 4.15 – Análise econômica para fazenda de búfalos.

Fonte: Do próprio autor.

Dos estudos apresentados este é o que possui maior consumo de energia, totalizando 40.695 kWh em um ano. Para compensar este sistema é necessário um gerador fotovoltaico com 31,8 kWp, que possui um total de 120 módulos fotovoltaicos dispostos em 6 *strings* com 20 módulos em série em cada. O inversor a ser utilizado é o ABB TRIO 27.6 trifásico 380 V. Esta fazenda terá gastos nos próximos 25 anos de R\$ 1.282.022,25 com energia elétrica. Porém, caso haja a instalação de um sistema solar, a partir de um investimento de aproximadamente R\$ 197.207,80, será possível economizar quase R\$ 1.084.814,50.

Para a planilha de cálculos de SFCR utilizado pela KZ Engenharia o sistema fotovoltaico dimensionado foi de 32,4 kWp, utilizando 120 módulos fotovoltaicos e um inversor BB Power 20,0 kW e outro BB Power 12 kW. A Figura 4.16 ilustra os dados gerados pelo sistema.

RENOVIGI - RESUMO DO PROJETO	
<b>DADOS DA INSTALAÇÃO</b>	
Cidade	Formiga
Estado	MG
Ligação Monofásica/Bifásica/Trifásica (M, B ou T?)	B
% de geração desejado em relação ao consumo médio mensal	100%
Latitude do local (graus)	22
Inclinação dos painéis considerada no projeto (graus)	20
Inclinação percentual dos painéis	34%
Consumo mínimo mensal para o tipo de ligação (kWh/mês)	50
Temperatura Máxima no local	40
Temperatura Mínima no local	12
Média de Horas de Sol Equivalente/dia ao longo do ano	5,6
<b>PAINEL</b>	
Potência de cada painel (W)	270
Quantidade de painéis	120
Estimativa de área para instalação (m2)	215
<b>INVERSOR</b>	
Modelo e Potência do Inversor	INVERSOR BB Power 20.0kW
Quantidade de inversores	24
<b>GERAÇÃO PREVISTA DE ENERGIA</b>	
Potência total do arranjo fotovoltaico	32,40 kW
Energia média mensal gerada pelo sistema	4.338 kWh/mês
Energia total / ano	52.052 kWh/ano
Energia média mensal gerada por painel	36 kWh/mês

Figura 4.16 – Sistema gerado pela planilha para fazenda de búfalos.

Fonte: Do próprio autor.

## 5 CONCLUSÃO

Como proposto no início deste trabalho, foi desenvolvido uma ferramenta computacional de auxílio no dimensionamento de um SFCR. Após um estudo sobre o funcionamento de um sistema fotovoltaico e como se realiza o dimensionamento do mesmo, definiu-se quais seriam as variáveis de entrada do *software* proposto. Com o objetivo de ser um programa de fácil configuração e rápido cálculo, desenvolveu-se a ferramenta computacional em linguagem JAVA com uma interface amigável e intuitiva. Buscando facilitar o dimensionamento de um sistema por um profissional da área, o SonneProgram (*software* desenvolvido) apresenta como dados de saída a lista de materiais, o diagrama unifilar e um estudo econômico do sistema proposto pelo programa.

No Capítulo 4 foi possível observar o desempenho do SonneProgram e analisar a qualidade dos dados fornecidos pelo programa. Observa-se que apesar de serem dados baseados em sistemas dimensionados no dia a dia, há uma possibilidade de melhora nesses dados. Estes dados se mostram confiáveis ao ser comparados com os dados fornecidos pela planilha Excel utilizados pela empresa KZ Engenharia. Analisando-se o ANEXO II é possível perceber o quão fácil, rápido e confiável é este *software*.

Como proposta para trabalhos futuros pode-se citar uma melhor interação com o SunData com o intuito de adquirir um melhor valor de HSP do local da instalação, melhorando o sistema dimensionado. Outro ponto é ajustar o valor final do projeto, que é utilizado no estudo de viabilidade econômica, para valores reais utilizado pelas empresas. De modo geral, caso este programa seja utilizado por empresas, será necessário a construção de um banco de dados para cada uma, em função dos equipamentos e preço que cada empresa trabalha.

Em suma, o *software* apresentado corresponde aos objetivos propostos e apresenta uma gama de aplicações reais no mercado solar, desde que sejam feitas as devidas alterações para cada empresa específica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. Inversores ABB. **String inverters**. Disponível em: <<http://new.abb.com/power-converters-inverters/solar/string>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

BLUESOL. BlueSol Educacional. **Introdução a Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://programaintegradoronline.com.br/livro/>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

CANADIAN SOLAR. *Solar Modules*. **Módulo Fotovoltaico 60 Células**. Disponível em: <<http://www.canadiansolar.com/solar-panels/standard.html>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

CRESESB. Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia solar: Princípios e Aplicações**. Disponível em: <[cresesb.cepel.br](http://cresesb.cepel.br)>. Acesso em: 05 jun. 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20\(Revisada\).pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20(Revisada).pdf)>. Acesso em: 05 jun. 2017.

FRONIOUS. Inversores Fronius. **Inversores Solares Fronius**. Disponível em: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-95EF6599-22B38298/fronius\\_brasil/hs.xsl/7552\\_10818.htm#.WTVqqmjyuUk](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-95EF6599-22B38298/fronius_brasil/hs.xsl/7552_10818.htm#.WTVqqmjyuUk)>. Acesso em: 05 jun. 2017.

IRENA. *International Renewable Energy Agency*. **Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Serie – Solar Photovoltaics**. Disponível em: <<http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=231>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

PENSAMENTO VERDE. **Mercado de Energia Solar Deve Crescer 300% em 2016**. Disponível em: <<http://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/mercado-de-energia-solar-deve-crescer-300-em-2016-preve-estudo/>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. e RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INEP, 2006.  
PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas Híbridos – Soluções Energéticas para Amazônia**. 1. ed. Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396 p.

PORTAL BRASIL. **Brasil Estará Entre os 20 Países Com Maior Geração Solar em 2018**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-estara-entre-os-20-paises-com-maior-geracao-solar-em-2018>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

PORTAL ENERGIA. **Energia Fotovoltaica – Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalação**. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 05 jun 2017.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. **Earth's Global Energy Budget – Bulletin of the American Meteorological Society**. Disponível em: <[http://www.cgd.ucar.edu/cas/Trenberth/trenberth.papers/TFK\\_bams09.pdf](http://www.cgd.ucar.edu/cas/Trenberth/trenberth.papers/TFK_bams09.pdf)>. Acesso em: ago. 2012.

VILLALVA, Marcelo Grandella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações: Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

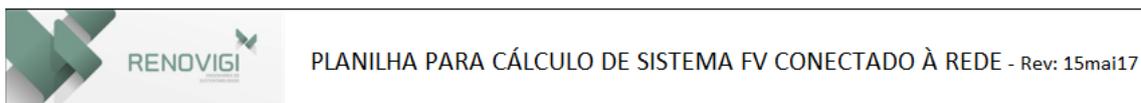
## ANEXO I

Tabela

<b>Informação</b>	<b>Significado ou importância da informação</b>
Nome do fabricante	Identificação do responsável pela qualidade do módulo.
Identificação do modelo	Pelo modelo pode-se identificar a folha de dados técnicos com informações sobre tecnologia, potência e tolerância.
Número de série	O número de série é obrigatório para registro, qualificação, rastreabilidade e garantia do produto.
Tensão de circuito aberto (Voc)	Multiplicando-se Voc de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se Voc do arranjo.
Corrente de curto-circuito (Isc)	Multiplicando-se Isc de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se Isc do arranjo.
Tensão de máxima potência (Vmp)	Multiplicando-se Vmp de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se Vmp do arranjo.
Corrente de máxima potência (Imp)	Multiplicando-se Imp de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se Imp do arranjo.
Potência nas condições padrões de ensaio (STC)	Potência máxima nominal do módulo nas condições de irradiância 1000 W/m <sup>2</sup> , espectro AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C.
Temperatura nominal da célula nas condições de operação (NOCT)	Temperatura das células do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m <sup>2</sup> , temperatura ambiente de 20°C e velocidade de vento de 1 m/s.
Potência nas condições de operação (Pmp)	Potência máxima do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m <sup>2</sup> , e temperatura de célula NOCT.
Tensão de máxima potência nas condições de operação (Vmp)	Tensão do ponto de máxima do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m <sup>2</sup> e temperatura NOCT.
Corrente de máxima potência nas condições de operação (Imp)	Corrente do ponto de máxima do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m <sup>2</sup> e temperatura NOCT.
Coeficiente de temperatura para tensão	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura ( $\beta$ ), em volts por grau Celsius.
Coeficiente de temperatura para corrente	Coeficiente de variação da corrente de curto circuito com a temperatura ( $\alpha$ ), em amperes por grau Celsius.
Coeficiente de temperatura para potência	Coeficiente de variação da potência máxima do módulo com a temperatura ( $\gamma$ ), em watts por grau Celsius.

Dimensões externas	Dimensões de largura, comprimento e espessura do módulo, incluindo moldura.
Número de células	Número de células associadas no módulo.
Tecnologia das células	Tipo de célula fotovoltaica e materiais envolvidos.
Desenho indicando furações	Desenho com localização das perfurações da moldura, para instalação dos módulos em painéis.

## ANEXO II



## DADOS PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

>>>>>>> Orientação para uso: Preencher somente os campos em AMARELO <<<<<<<<<

## DADOS DA FATURA DE ENERGIA

Cidade	Formiga
Estado	MG
Ligação Monofásica/Bifásica/Trifásica (M, B ou T?)	B
Tensão entre Fase e Neutro na sua cidade	127
% de geração desejado em relação ao consumo médio mensal	100%

## Consumo mensal de energia em kWh

Janeiro	3.327
Fevereiro	3.454
Março	3.427
Abril	3.341
Maio	2.101
Junho	3.283
Julho	3.200
Agosto	2.484
Setembro	3.080
Outubro	3.014
Novembro	7.390
Dezembro	2.594
<b>Total</b>	<b>40.695</b>
<b>Média</b>	<b>3.391</b>

## DIMENSIONAMENTO

\*\*\* Preencher somente campos em AMARELO \*\*\*

ESCOLHA A POTÊNCIA DO PAINEL	270W
Quantidade calculada de módulos necessários	92,4
Quantidade TOTAL de painéis a ser considerada no projeto	120
Estimativa de área ocupada (m <sup>2</sup> )	215

## ESCOLHA DO INVERSOR E QUANTIDADE

Modelo do Inversor com base na quantidade de Módulos - ESCOLHA	INVERSOR BB Power 20,0kW
Quantidade de Inversores necessários	1,5
Quantidade escolhida de Inversores	24
Quantidade média de painéis por Inversor	5,0
Quantidade média de painéis por entrada do Inversor	1,3

Cada MPPT deve ter os painéis em mesma orientação e mesma inclinação. Será necessário um Autotransformador 380/220 V para que possa utilizar Inversores Trifásicos 380V em sua instalação. Utilize-se todas entradas do Inversor

1376      2876

	Limite	Calculado	Status
Potência Máxima total na entrada do inversor para a configuração calculada	20.500	1.241	OK
Relação entre Energia Média Gerada e Compensável (tolerância em 5% acima)	3.341	4.338	ATENÇÃO: Energia GERADA MAIOR que a COMPENSÁVEL - Verifique e, se necessário, reduza a quantidade de painéis