

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



LILIAN NAKO FUJIWARA

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIMENSIONAMENTO DE
SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE
ATRAVÉS DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS E
MÉTODO ANALÍTICO**

**VITÓRIA – ES
JANEIRO/2018**

LILIAN NAOKO FUJIWARA

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ATRAVÉS DE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS E MÉTODO ANALÍTICO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Lilian Naoko Fujiwara, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin

VITÓRIA – ES
JANEIRO/2018

LILIAN NAOKO FUJIWARA

**ESTUDO COMPARATIVO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ATRAVÉS DE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS E MÉTODO ANALÍTICO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Lilian Naoko Fujiwara, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 5 de Janeiro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Msc. Adan Lúcio Pereira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

RESUMO

O presente trabalho consiste em comparar projetos de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica elaborados pelo método analítico e através de três ferramentas computacionais disponíveis no mercado. Os programas escolhidos para elaboração do dimensionamento foram o *Sunny Design*, PV*SOL e PVsyst. Este trabalho realiza uma análise dos procedimentos e aspectos considerados por cada método e dessa forma, compreender as semelhanças e diferenças dos resultados. O sistema fotovoltaico será dimensionado para suprir parte da energia consumida em uma empresa localizada no município da Serra, no Espírito Santo, utilizando toda a área disponível.

Palavras chaves: sistema fotovoltaico, *software*, método analítico, dimensionamento.

ABSTRACT

The present work consists of a comparison of projects of a grid-connected photovoltaic system developed through analytical method and three computational tools which are commercially available. The chosen *software* for dimensioning the project were *Sunny Design*, PVSOL and PVsyst. This paper performs an analysis of the procedures and aspects considered by each method, and so, to understand the similarities and differences of the obtained results. The photovoltaic system is dimensioned to supply a portion of consumed energy by a company located in the Municipality of Serra, in Espírito Santo, exploring all the available area.

Keywords: photovoltaic system, *software*, analytical method, dimensioning.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por estar sempre presente em minha mente, me orientando e me dando força e luz em todas as minhas ações.

Aos meus queridos pais Elio e Emilia, pelo amor e carinho durante toda a trajetória da minha vida, pelo incentivo, suporte e sacrifícios que tiveram para me proporcionar conforto e conhecimento.

Ao meu irmão Eduardo pela paciência, compreensão e parceria, principalmente durante os momentos mais estressantes da faculdade.

Agradeço, em especial, ao meu namorado Andrei pelo intenso apoio dado durante a elaboração deste trabalho e pelo companheirismo no último ano do curso. Obrigada por toda a força, carinho e palavras de incentivo que me deram energia para continuar seguindo em frente e nunca desistir.

Agradeço aos meus amigos e colegas da faculdade pela companhia durante as aulas, pelos momentos de descontração nos intervalos, pela união e ajuda durante os dias, as noites e as madrugadas estudando para provas e fazendo trabalhos.

A todos os professores que tive contato, não só pelo conteúdo da disciplina, mas por cada ensinamento de vida, ética e conselho pessoal e profissional que cada um transmitiu durante e fora das aulas. Em especial, à Profa. Dra. Jussara Farias Fardin, pela orientação deste trabalho e por citar em uma de suas aulas que existe um lugar reservado para cada um e cada um sempre achará um lugar que se identifica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da capacidade instalada de sistema fotovoltaico no mundo.....	15
Figura 2 - Componentes da radiação solar.	16
Figura 3 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.	18
Figura 4 - Curva IxV de duas células fotovoltaicas de silício conectadas em série.....	19
Figura 5 - Curva IxV de duas células fotovoltaicas de silício conectadas em paralelo.....	19
Figura 6 - Célula de Si monocristalino.	20
Figura 7 - Célula de silício policristalino.	20
Figura 8 - Influência da variação da irradiação solar incidente em uma célula FV mantida na mesma temperatura.	21
Figura 9 - Influência da temperatura da célula FV nos parâmetros de tensão e corrente para a mesma irradiação.....	21
Figura 10 - Menu inicial do <i>Sunny Design</i>	22
Figura 11 – Opções de sistema fotovoltaico oferecidas pelo <i>Sunny Design</i>	23
Figura 12 - Opções de perfil de carga para habitação privada.	24
Figura 13 - Criação de perfil de carga no <i>Sunny Design</i>	25
Figura 14 - Configuração do gerador FV.	26
Figura 15 - Configuração do módulo FV de acordo com o alinhamento e tipo de montagem.	26
Figura 16 - Modos de dimensionamento do inversor.	27
Figura 17 - Opções de inversores para o gerador FV formado por módulos FV da marca Jinko Solar.	28
Figura 18 - Tipos de sistema disponíveis no PVSOL Premium.....	29
Figura 19 - Criando um novo local no PV*SOL.....	29
Figura 20 - Opção de importar dados de demanda ou consumo.	30
Figura 21 - Configuração do gerador FV.	31
Figura 22 - Exemplo do comportamento da potência considerando uma degradação linear.	32
Figura 23 - Exemplo do comportamento da potência considerando uma degradação exponencial.....	33
Figura 24 - Exemplo de resultado de critérios de qualidade do dimensionamento.	34
Figura 25 - Resultado do dimensionamento de inversor para determinada quantidade de módulos FV.	34

Figura 26 - Tela inicial do programa PVsyst.....	35
Figura 27 - Configuração de um novo local.	36
Figura 28 - Orientação do módulo FV.....	36
Figura 29 - Otimização da posição do módulo FV.	37
Figura 30 - Resultado de dimensionamento do inversor para um determinado gerador FV..	38
Figura 31 - Perda da qualidade dos módulos FV.	39
Figura 32 - Desempenho do sistema em relação a degradação do módulo FV.....	40
Figura 33 - Características elétricas do módulo FV escolhido.....	46
Figura 34 - Especificações elétricas do inversor STP 50-40.....	48
Figura 35 – Dados meteorológicos da cidade próxima à instalação.	55
Figura 36 – Perfil de consumo traçado pelo <i>Sunny Design</i>	56
Figura 37 – Resumo do perfil de carga computado pelo <i>Sunny Design</i>	56
Figura 38 – Configuração dos geradores FV do galpão 5.	57
Figura 39 - Dimensionamento do inversor para o galpão 1 realizado pelo <i>Sunny Design</i>	57
Figura 40 - Vista geral do resultado fornecido pelo <i>Sunny Design</i>	59
Figura 41 – Exemplo de esquema de ligação do sistema FV conectado à rede com consumidores elétricos.....	60
Figura 42 - Definição do local e rede no PV*SOL.	60
Figura 43 - Perfil de carga da unidade consumidora traçado pelo PVSOL Premium.	61
Figura 44 - Configuração do gerador FV no PVSOL.	61
Figura 45 - Degradação do módulo FV considerado no sistema.	62
Figura 46 - Cobertura do consumo pelas fontes existentes no sistema.	63
Figura 47 - Otimização da posição do módulo FV.	64
Figura 48 - Configuração do gerador FV.	65
Figura 49 - Configuração do inversor fornecida pelo PVsyst.	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de energia mensal no período de Novembro de 2016 a Outubro de 2017	
.....	42
Gráfico 2 - Consumo de energia mensal no período de Março de 2017 a Outubro de 2017.	42
Gráfico 3 - Temperaturas médias mínimas no período de Janeiro de 2016 à Setembro de 2017.	
.....	49
Gráfico 4 - Temperaturas médias máximas no período de Janeiro de 2016 à Setembro de 2017.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo mensal de energia da empresa.	41
Tabela 2 - Irradiação solar diária média mensal em kWh/m ² /dia.	43
Tabela 3 - Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos para cada latitude local.	44
Tabela 4 - Dimensão do telhado de cada galpão da indústria.	44
Tabela 5 - Energia gerada em cada galpão em kWh/dia.	47
Tabela 6 - Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico corrigido.	50
Tabela 7 – Correção da tensão do módulo FV operando em máxima potência.	52
Tabela 8 – Quantidade de módulos Fv _{mínimo} e máximo associados em série para atender o MPPT.	52
Tabela 9 – Quantidade total de módulos FV conectados a um inversor.	53
Tabela 10 – Quantidade de inversor e FDI em cada galpão.	54
Tabela 11 - Quantidade de módulos FV em cada entrada do inversor.	58
Tabela 12 - Quantidade de inversores em cada galpão, rendimento e FDI.	59
Tabela 13 - Quantidade de módulos FV em cada entrada do inversor.	62
Tabela 14 - Quantidade de inversores por galpão e FDI.	63
Tabela 15 - Quantidade de inversores para cada galpão.	66
Tabela 16 - Quantidade de inversores definidos no projeto por cada método.	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais características dos programas computacionais.	69
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COP – Conferência das Partes

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ES – Espírito Santo

FDI – Fator de Dimensionamento do Inversor

FV – Fotovoltaico

IEA – *International Energy Agency*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MPPT – *Maximum Power Point Tracker*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

PVPS – *Photovoltaic Power System*

SPMP – Seguidor do Ponto de Máxima Potência

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Energia solar	16
2.2	Geração fotovoltaica	17
2.2.1	Efeito fotovoltaico	17
2.2.2	Célula fotovoltaica	17
2.2.3	Influência da irradiação e temperatura	20
3	CARACTERIZAÇÃO DOS PROGRAMAS	22
3.1	<i>Software Sunny Design</i>	22
3.1.1	Definição do tipo de sistema	22
3.1.2	Dados meteorológicos	23
3.1.3	Caracterização do perfil de carga	23
3.1.4	Configuração do gerador FV	25
3.1.5	Configuração do inversor	26
3.2	<i>Software PV*SOL</i>	28
3.2.1	Definição do tipo de sistema, clima e rede	28
3.2.2	Caracterização do perfil de carga	30
3.2.3	Configuração do gerador FV	31
3.2.4	Escolha do inversor	33
3.3	<i>Software PVsyst</i>	34
3.3.1	Definição do tipo de sistema e localização	35
3.3.2	Orientação dos módulos FV	36
3.3.3	Definição do gerador FV	37
3.3.4	Definição do inversor	38
3.3.5	Detalhe das perdas de potência	38
4	CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA	41
4.1	Características da planta e consumo	41
4.2	Radiação solar no local	43
4.3	Área disponível para instalação do sistema	44
5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	45

5.1	Método analítico.....	45
5.1.1	Dados de irradiação solar	45
5.1.2	Dimensionamento do gerador fotovoltaico.....	45
5.1.3	Dimensionamento do inversor	48
5.2	Dimensionamento pelo <i>Sunny Design</i>	54
5.2.1	Definir dados do projeto	54
5.2.2	Dados meteorológicos do local.....	55
5.2.3	Determinação do perfil de carga no <i>Sunny Design</i>	55
5.2.4	Configuração do gerador FV	56
5.2.5	Configuração do inversor.....	57
5.2.6	Vista geral do resultado.....	59
5.3	Dimensionamento pelo PV*SOL	60
5.3.1	Configurações do projeto	60
5.3.2	Determinação do perfil de carga.....	60
5.3.3	Configuração do gerador FV	61
5.3.4	Configuração do inversor.....	62
5.3.5	Produção e consumo de energia	63
5.4	Dimensionamento pelo PVsyst	64
5.4.1	Configuração do projeto.....	64
5.4.2	Orientação do módulo FV	64
5.4.3	Determinação do gerador FV.....	65
5.4.4	Configuração do inversor.....	65
6	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	67
7	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
	ANEXO A.....	74
	ANEXO B	76
	ANEXO C	78

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as necessidades energéticas mundiais aumentaram gradualmente, acompanhando o crescimento populacional e industrial. A Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2007) calcula que o consumo de energia elétrica alcançará uma faixa de 950 a 1.250 TWh/ano em 2030. Isso significa que, mesmo com um aproveitamento de 80% do potencial hidráulico brasileiro, ainda não será suficiente para atender esta demanda (SUZUKI; REZENDE, 2013). Soma-se a isso, o fato de que a principal fonte energética durante muitos anos tenha sido o petróleo, originado de combustíveis fósseis, sendo um dos maiores responsáveis pelo aquecimento global.

Durante a celebração do Acordo de Paris contra os gases de efeito estufa, na Conferência das Partes - COP 21, ocorrido em 2015, o Brasil assumiu compromisso de reduzir emissões de gases no período de 2025 e 2030, em 37% e 43%, respectivamente, em relação aos níveis registrados em 2005 (NASCIMENTO, 2017). Dessa forma, é necessário a busca de novas tecnologias para suprir a demanda de energia, de forma limpa, sustentável e inesgotável.

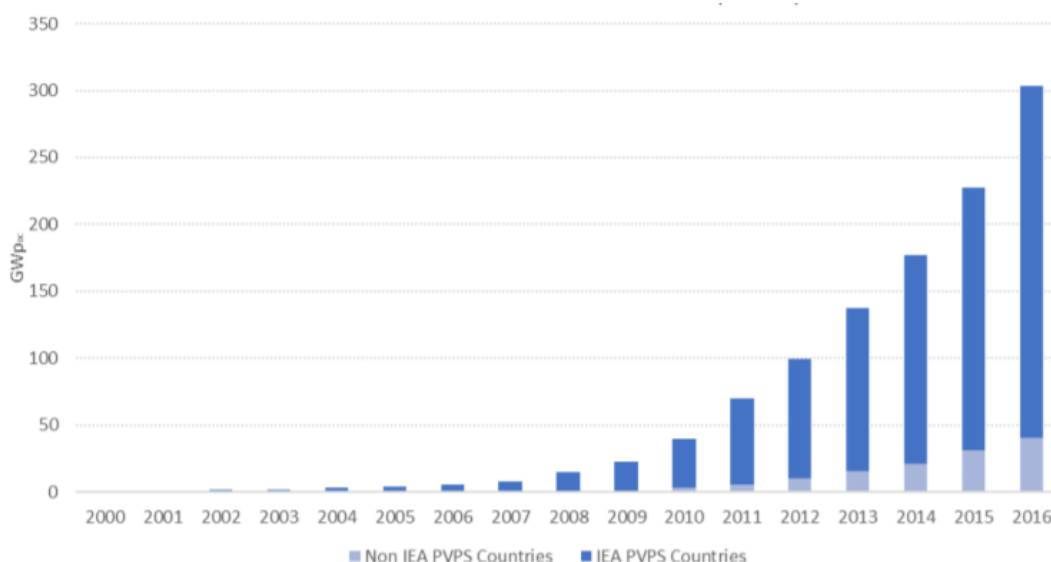
A energia solar é uma fonte alternativa de energia que mais se destaca, pela abundância, de fácil aplicação e de acordo com as questões ambientais. Ela pode ser aproveitada de forma direta (energia térmica) ou convertida em energia elétrica. O Brasil possui grande potencial fotovoltaico, já que sua área é localizada próximo aos trópicos e a incidência solar é garantida e quase homogênea durante todas as estações do ano.

Segundo a Agência Internacional de Energia - IEA (2017), a energia fotovoltaica tem se destacado significativamente nos últimos anos, apresentando um crescimento exponencial do uso dessa fonte. Em 2016, foi atingida uma capacidade total instalada de 303,1 GWp., como mostra a Figura 1. A IEA desenvolve o Programa de Sistema de Energia Fotovoltaica – PVPS, cuja finalidade é promover o papel da energia fotovoltaica no mundo e é formado por 30 membros, como Alemanha, China, Itália, Japão, dentre outros. Na Figura 1, observa-se a capacidade total instalada de sistemas FV nos países membros e não membros do programa.

Assim, nota-se que a utilização da energia do Sol para geração de energia elétrica tem se intensificado cada vez mais no mundo. Para que haja o melhor aproveitamento possível dessa

abundante energia solar, os projetos de sistemas fotovoltaicos devem ser bem dimensionados para atender a demanda de interesse, visando o uso adequado dos materiais e da área de instalação.

Figura 1 - Crescimento da capacidade instalada de sistema fotovoltaico no mundo.



Fonte: IEA, (2017).

Atualmente, existem diversas ferramentas para auxiliar na construção de projetos de sistemas FV. Os projetos, muitas vezes, não são idênticos, pois há uma variedade de fatores que são consideradas, assim como ocorre em projetos elétricos de uma residência, por exemplo.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação de resultados de dimensionamento de um sistema de minigeração fotovoltaica conectado à rede elétrica. Para isso, serão utilizados o método analítico e três programas computacionais disponíveis no mercado para dimensionamento de sistemas de geração de energia elétrica utilizando a energia solar. São eles: *Sunny Design*, *PV*SOL* e *PVsys*. Assim, será possível verificar a performance de cada *software*, apontando os aspectos considerados em cada caso e compreender as semelhanças e diferenças dos resultados. Os projetos serão elaborados para atender parte da demanda de uma empresa localizada no município da Serra, no Espírito Santo, de forma que se utilize toda a área disponível para a instalação dos equipamentos formados pelo sistema fotovoltaico, e assim, produzir a maior quantidade de energia elétrica possível.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

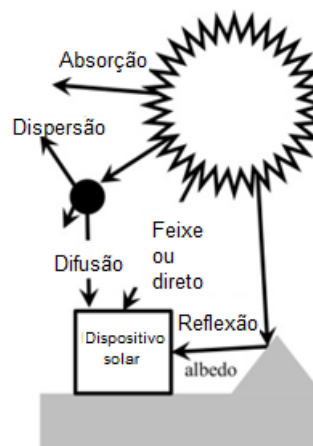
O projeto proposto está intimamente ligado ao tema de fontes alternativas de energia, neste caso, o aproveitamento de energia solar para geração de eletricidade. A captação da energia proveniente dos raios solares é feita através de um dispositivo fabricado com material semicondutor. A seguir, serão abordados conceitos e a base teórica utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Energia solar

A energia do Sol é considerada inesgotável na escala terrestre de tempo e é uma fonte de luz e calor. Sabe-se que apenas uma parte da radiação solar emitida pela fonte atinge a superfície da Terra. Essa radiação corresponde a aproximadamente $1,5125 \times 10^{18}$ kWh por ano, sendo transmitida em forma de radiação eletromagnética, composta por cerca de 50% de luz visível, 45% de radiação invisível infravermelha e 5% de radiação ultravioleta (NETO, 2017).

A parcela da radiação que ultrapassa a atmosfera é dividida em várias componentes, sendo a radiação direta e a difusa, ilustrado pela Figura 2. A radiação direta é recebida pela superfície terrestre em linha reta, ou seja, sem passar por obstáculos durante seu trajeto. Já a radiação difusa atravessa a atmosfera sendo refratada ou refletida por componentes atmosféricos como nuvens, neblinas, poeiras e gases.

Figura 2 - Componentes da radiação solar.



Fonte: MACKAY, M. (2015).

A análise do potencial de radiação solar é essencial para determinar a viabilidade de implantação de um sistema fotovoltaico no local de interesse.

2.2 Geração fotovoltaica

2.2.1 Efeito fotovoltaico

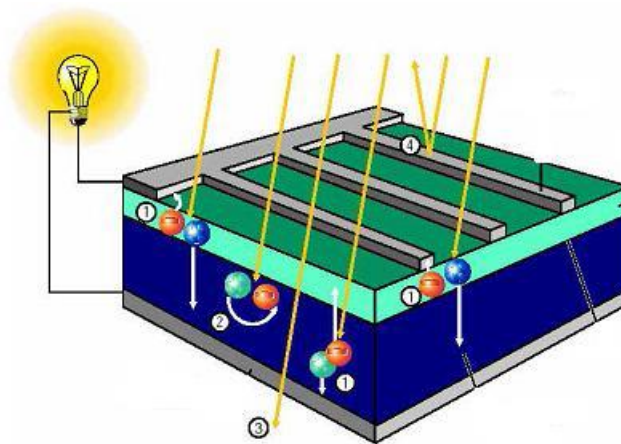
A existência de uma diferença de potencial elétrico nas extremidades de um material semicondutor é o chamado efeito fotovoltaico. Este fenômeno foi observado pela primeira vez pelo físico francês Edmund Becquerel em 1839. Sua descoberta teve origem em um experimento em que placas metálicas de prata mergulhadas em uma solução de eletrólito, produziam uma corrente elétrica quando raios luminosos incidiam sobre elas. A descoberta desse fenômeno impulsionou experiências envolvendo selênio, que ao ser exposto à radiação solar, produzia uma corrente elétrica. Esse experimento foi realizado em 1877, por Willian Adams e seu aluno Richard Day, autores do primeiro dispositivo sólido de conversão de energia solar em eletricidade. A estrutura desenvolvida por eles possuía rendimento de aproximadamente 0,5% (COSTA, 2015). Com o passar dos anos, as células fotovoltaicas evoluíram através de grandes contribuições tecnológicas e pela incessante busca de soluções em aplicações nos diversos ramos da ciência. No final da década de 50, foi iniciada a implantação de células fotovoltaicas nos programas espaciais, de maneira a fornecer energia para satélites. Desde então, o progresso da tecnologia das células interage cada vez mais com o meio ambiente e a sociedade, de modo a alterar o cenário de dependência de fontes de energia que degradam o planeta.

2.2.2 Célula fotovoltaica

O módulo fotovoltaico é constituído de células de material semicondutor, geralmente de silício, que ao serem incididas por raios solares, conduzem energia elétrica. O cristal de silício puro não possui elétrons livres em sua camada de valência, portanto é um mau condutor elétrico. Assim, o mesmo é dopado com outros elementos químicos como o boro e o fósforo, transformando-se em um material carregado de portadores de carga negativa (silício tipo N) ou de portadores de carga positiva, ou seja, déficit de elétrons livres (silício tipo P). No caso da célula fotovoltaica, a junção dos dois tipos de silício forma o material semicondutor (junção PN). Ao serem unidas, um campo elétrico permanente é gerado na junção PN, ou seja, elétrons

livres de um lado e espaços vazios do outro. A Figura 3 ilustra a estrutura básica de uma célula fotovoltaica com as camadas descritas anteriormente.

Figura 3 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.



Fonte: COSTA, (2010).

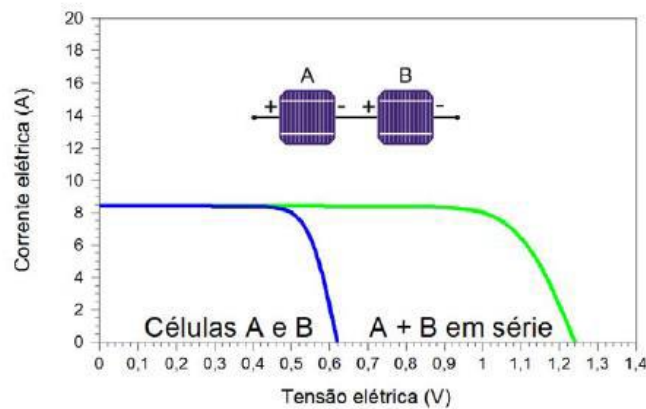
Desse modo, cria-se uma barreira que impede o fluxo de elétrons em qualquer direção, à exceção de uma energia adicional incidente no material capaz de vencer tal barreira.

A incidência de raios solares sobre as células fotovoltaicas fornece energia para que os elétrons dos átomos de silício sejam conduzidos através de um condutor externo. Dessa forma, tem-se a corrente elétrica fluindo. Tal corrente é proporcional à irradiância que incide sobre a célula. O nível de tensão que uma única célula fotovoltaica pode alcançar é aproximadamente 0,5V, considerando seu ponto máximo de potência. Portanto, é necessário rearranjá-las de forma a obter valores mais altos, e assim, vantajosos de se trabalhar com esses elementos.

As células fotovoltaicas são interligadas entre si através de associações em série e em paralelo, atendendo a necessidade da instalação. A ligação em série, para dispositivos idênticos e submetidos à mesma irradiância, apresenta um aumento na tensão, não alterando o valor da corrente fluindo no conjunto. Já em paralelo, há um aumento na corrente. Nota-se que os terminais positivos devem ser interligados entre si, assim como os terminais negativos. O efeito de cada tipo de associação pode ser observado pelas Figuras 4 e 5.

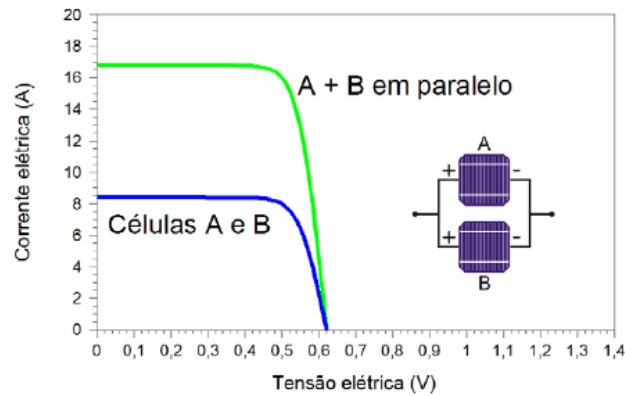
Assim, o conjunto de células interligadas entre si forma o que é nomeado de módulos fotovoltaicos.

Figura 4 - Curva IxV de duas células fotovoltaicas de silício conectadas em série.



PINHO; GALDINO, (2014).

Figura 5 - Curva IxV de duas células fotovoltaicas de silício conectadas em paralelo.



PINHO; GALDINO, (2014).

As tecnologias mais comuns para fabricação de células fotovoltaicas são o silício (Si) monocristalino, policristalino e o filme fino de silício.

O Si monocristalino é formado pelo aquecimento em altas temperaturas de blocos de Si ultrapuro e depois submetidos a um processo de formação de cristal. O resultado é a produção de lingotes de Si monocristalino, com uma estrutura molecular homogênea. Assim, o lingote é serrado, gerando fatias em formato redondo, que são submetidos a processos químicos para receberem impurezas, formando as camadas P e N. Após esse processo, a célula recebe uma película metálica em uma face e uma grade metálica em outra. Por último, um material anti-reflexivo é colocado na face que receberá os raios solares. A Figura 6 ilustra a célula de Si monocristalino.

Figura 6 - Célula de Si monocristalino.



Fonte: COSTA, (2010).

O Si policristalino é formado por umaglomeração de cristais de tamanhos e orientações diferentes. São produzidos lingotes fatiados desse material, porém através de um método diferente. A aparência da célula utilizando essa tecnologia apresenta manchas em sua coloração devido ao tipo de silício empregado na fabricação, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Célula de silício policristalino.



Fonte: COSTA, (2010).

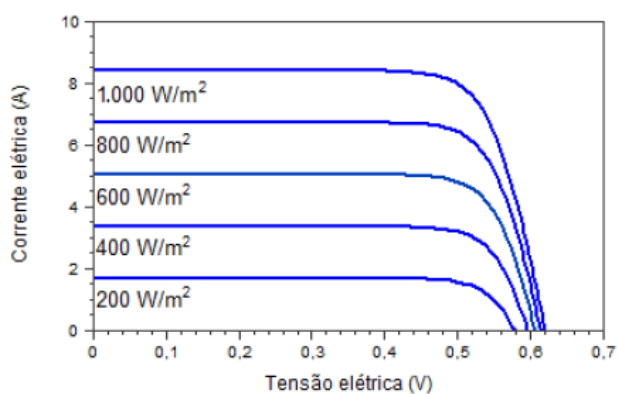
As células de filme fino de Si são tecnologias mais recentes, onde não há fabricação de lingotes. São camadas finas do componente depositados em uma base rígida ou flexível. Nesse processo, é garantido que quantidades suficientes de matéria-prima sejam empregadas na fabricação das células. A eficiência da célula de filme fino é menor do que as tecnologias apresentadas anteriormente.

2.2.3 Influência da irradiação e temperatura

A irradiação solar e a temperatura da célula fotovoltaica são os principais fatores que influenciam no seu desempenho.

Com o aumento da irradiação solar incidente na célula ou no módulo FV, a corrente gerada por ela aumenta linearmente e se a sua temperatura for mantida constante, a tensão de circuito aberto se eleva de forma logarítmica (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 8 mostra como a tensão e a corrente de uma célula FV são afetadas com esse aumento de irradiação solar, mantida a mesma temperatura.

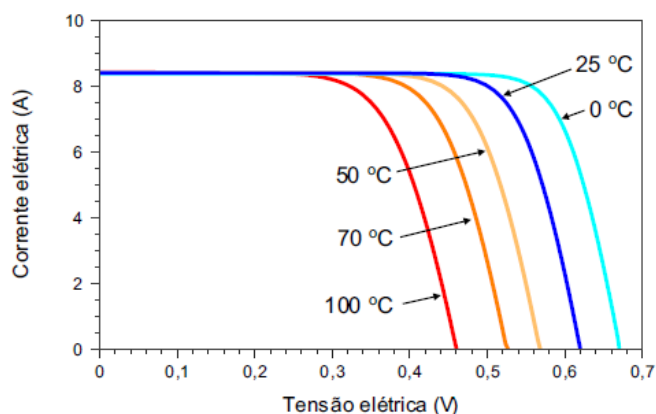
Figura 8 - Influência da variação da irradiação solar incidente em uma célula FV mantida na mesma temperatura.



Fonte: PINHO; GALDINO, (2014).

A temperatura da célula varia com as condições de irradiação solar e temperatura ambiente que está submetida. Quando um desses parâmetros ou os dois sofrem uma elevação de seu valor, a temperatura da célula também se eleva, reduzindo sua eficiência. Isso ocorre pois a tensão da célula é reduzida com o aumento da temperatura e em baixas temperaturas, acontece o fenômeno oposto, ou seja, sua tensão se eleva. A Figura 9 mostra o comportamento da tensão e corrente com a variação da temperatura da célula FV.

Figura 9 - Influência da temperatura da célula FV nos parâmetros de tensão e corrente para a mesma irradiação.



Fonte: PINHO; GALDINO, (2014).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS PROGRAMAS

Neste trabalho, são utilizados três *softwares* para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Cada programa possui uma forma própria de utilização e execução do dimensionamento, além de fornecer ferramentas distintas durante o procedimento. A seguir, é apresentada a característica de cada *software*, abordando as etapas a serem utilizadas neste trabalho.

3.1 *Software Sunny Design*

O *Sunny Design* é uma ferramenta computacional desenvolvida pela empresa alemã Solar Technology AG – SMA. Desenvolve produtos de alta tecnologia para sistemas FV, como inversores, baterias, dispositivos para monitoramento e controle, entre outros.

O *software* é disponível na versão online e para *download*, ambos de livre aquisição. O único requisito para obtê-lo é realizar um cadastro via website, validando o registro por um endereço de e-mail.

O programa pode ser utilizado em 14 idiomas, entre elas, português e inglês.

3.1.1 Definição do tipo de sistema

Inicialmente, o usuário deve criar um novo projeto, opção encontrada no menu do programa, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Menu inicial do *Sunny Design*.



Fonte: *Sunny Design*.

O dimensionamento de sistema FV pode ser realizado para quatro configurações distintas, considerando ou não a conexão à rede, com ou sem autoconsumo, e também adicionar um grupo de geradores movidos a óleo combustível, diesel, gás natural ou gasolina na opção de projeto híbrido. A Figura 11 ilustra a interface encontrada pelo usuário.

Figura 11 – Opções de sistema fotovoltaico oferecidas pelo *Sunny Design*.

Seleccionar tipo de projecto

Seleccione aqui o tipo de projecto que deseja criar:

- Projecto fotovoltaico**
Dimensionar sistema fotovoltaico sem autoconsumo
- Projecto fotovoltaico com autoconsumo**
Dimensionar sistema fotovoltaico com autoconsumo
- Projecto fotovoltaico sem ligação à rede**
Dimensionar sistema de rede isolada
- Projecto híbrido fotovoltaico**
Dimensionar sistema híbrido fotovoltaico

☐ Aceitar este tipo de projecto como predefinição

Fonte: *Sunny Design*.

3.1.2 Dados meteorológicos

Para o desenvolvimento do sistema FV, o programa analisa os dados de irradiação solar do local e a temperatura ambiente, já que os mesmos influenciam na conversão de energia. Como cada área possui uma característica própria, o programa fornece os dados meteorológicos de vários locais do mundo. Algumas cidades do Brasil são listados para o responsável do projeto selecionar seu interesse, porém como a lista não é completa, é permitido criar um novo local e inserir as informações necessárias manualmente. Outra alternativa é importar um documento com os dados. O *software* aceita o formato .epw, .dat, .csv. Esse último pode ser realizado em uma planilha do Microsoft Excel, por exemplo e o *software Sunny Design* disponibiliza as regras de elaboração e organização dos dados para ser compatível com o mesmo.

3.1.3 Caracterização do perfil de carga

O perfil de consumo da instalação que receberá o sistema FV deve ser bem definido para que a geração atenda sua demanda conforme a real necessidade.

O programa fornece uma variedade de perfil de carga para três estabelecimentos: habitação privada, empresa e indústria. Na habitação privada, o perfil de carga varia de acordo com o número de moradores, a idade e se trabalha ou não, já que esses fatores influenciam no consumo de energia. As opções para essa instalação podem ser vistas na Figura 12.

Figura 12 - Opções de perfil de carga para habitação privada.

Dados relativos ao perfil de carga

Tipo de perfil de carga*

☒ Habitação privada

Perfil de carga*

- 1 adulto que não trabalha
- 1 adulto que trabalha
- 2 adultos (1 trabalha por turnos), 1 criança
- 2 adultos (1 trabalha), 1 filho
- 2 adultos (1 trabalha), 2 filhos
- 2 adultos (1 trabalha), 3 crianças
- 2 adultos, ambos trabalham
- 2 adultos, ambos trabalham por turnos
- 2 adultos, ambos trabalham, 2 filhos
- 2 adultos, nenhum trabalha
- 3 adultos (2 trabalham)
- 4 adultos (2 trabalham), 2 crianças
- Domicílio 1 pessoa
- Domicílio 2 pessoas
- Domicílio 3 pessoas
- Domicílio 4 pessoas
- Domicílio 5 pessoas

Fonte: Sunny Design.

Já as alternativas para empresa e indústria variam de acordo com o tipo de atividade e o período de funcionamento, também bem caracterizados pelo programa.

Outra maneira de traçar o perfil de carga é adicionar dados reais, como mostra a Figura 13, tornando a caracterização de consumo mais verdadeira.

Os dados de consumo podem ser referentes ao período de um ano (365 ou 366 dias) ou de uma semana, em intervalos de 5, 10, 15, 30 ou 60 minutos. Além disso, aceita-se o consumo (em kWh) ou a demanda da unidade consumidora, em W ou kW.

Outra maneira de editar o perfil de carga é inserir dados reais de demanda diária durante uma semana de cada estação do ano, sendo que essas informações são contidas na memória de massa da unidade consumidora referente ao mês de cada estação do ano. O programa, então, constrói um perfil de consumo de acordo com as informações inseridas.

Figura 13 - Criação de perfil de carga no *Sunny Design*.

Fonte: *Sunny Design*.

3.1.4 Configuração do gerador FV

O *software* apresenta modelos de módulos FV de diversos fabricantes para que o dimensionamento seja efetuado com base em materiais comercializados. Seu banco de dados possui muitas opções, entretanto podem ser adicionados novos modelos que não estejam listados, devendo o usuário retirar as informações técnicas da folha de dados fornecida pelo desenvolvedor, e assim, preencher de forma correta os campos obrigatórios para criação do novo modelo no programa.

Nesta etapa, o programa permite adicionar vários geradores FV distintos, isto é, criar subprojetos no mesmo sistema, pois esses serão parte do mesmo consumidor, porém em arranjos separados. Caso o responsável por um projeto deseje instalar módulos FV em telhados de diferentes estruturas, porém do mesmo estabelecimento, basta criar os subprojetos e definir o modelo e quantidade a ser utilizado em cada um. Desse modo, todos os subprojetos terão as mesmas características definidas anteriormente.

Assim, para configurar o gerador FV, é necessário selecionar o fabricante e o modelo através da lista fornecida no programa e a quantidade, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Configuração do gerador FV.

▼ Geradores fotovoltaicos					
Nome	Fabricante / módulo fotovoltaico / electrónica de módulos			Número de módulos fotovoltaicos / potência de pico	Alinhamento / tipo de montagem
1 Galpão 1	Canadian Solar Inc.	CS6U-340M Maxpower (01/2017)	 	516 módulos fotovoltaicos 175,44 kWp	  180 °  20 ° 

Fonte: *Sunny Design*.

Além disso, deve-se indicar o tipo de montagem do módulo FV, a inclinação angular e o sentido que ele está apontando, existindo a opção de estruturas não fixas, ou seja, que sigam a posição do Sol, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Configuração do módulo FV de acordo com o alinhamento e tipo de montagem.

Cancelar alterações

Alterar o alinhamento / tipo de montagem

Aceitar as alterações

Aqui pode alterar o azimute e a inclinação dos módulos fotovoltaicos ou seleccionar se estes fazem seguimento. O tipo de montagem influencia o aquecimento das células solares em relação à temperatura ambiente.

☐ Alterar todos os geradores fotovoltaicos

Tipo de montagem

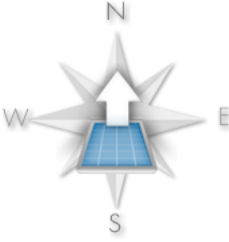

Montagem livre


Telhado


Fachada


Integrado

Azimute



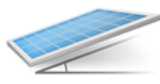
▼

180

▲

☐ segue o sol

Inclinação



▼

20

▲

☐ segue o sol

Fonte: *Sunny Design*.

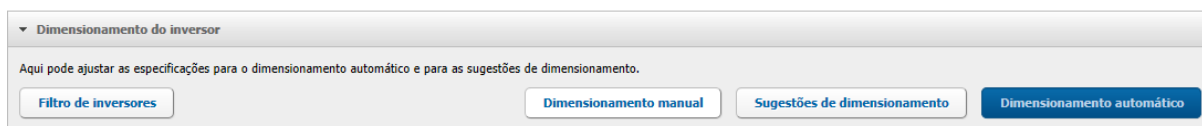
3.1.5 Configuração do inversor

Ao contrário da disponibilidade de módulos FV, a lista de inversores fornecida pelo *software* é restrita aos modelos fabricados pela SMA e não é possível adicionar modelos novos.

A configuração do inversor é iniciada com a escolha do modelo de inversor.

Há três modos de dimensionamento de inversor para o sistema, sendo um feito manualmente e dois automáticos, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Modos de dimensionamento do inversor.



Fonte: *Sunny Design*.

No modo manual, o dimensionamento é realizado pelo usuário, sendo ele o responsável por decidir o modelo do inversor e a quantidade. É válido lembrar que é possível utilizar mais do que um modelo, podendo ser vantajoso ou não para o sistema.

O modo “sugestões de dimensionamento” retorna várias opções de conjunto inversor-gerador FV, de forma a atender as especificações de ambos. O usuário pode optar por um dimensionamento com apenas um modelo de inversor, ou até três modelos diferentes. Esse modo sugere várias opções de arranjos e indica a quantidade de inversores necessários, e assim, o usuário pode analisar as informações de cada arranjo e escolher a opção que mais lhe atende. Já no modo “dimensionamento automático” o programa retorna a opção considerada mais rentável, segundo seu banco de dados, não avaliando a eficiência energética do resultado escolhido.

Outra característica do *software* é que, como para cada gerador FV há uma lista de sugestões de inversores, muitas vezes extensas dependendo do sistema, é possível selecionar as opções de interesse e dispô-las lado a lado, com suas respectivas características técnicas, o que facilita a comparação e escolha, como pode ser visto na Figura 17.

Como há várias sugestões oferecidas pelo programa, o usuário deve considerar os itens do equipamento que melhor atenderá o projeto, como o FDI, o rendimento, a quantidade de inversores utilizados e a quantidade de modelos distintos. Este último é um fator importante, visto que é interessante fazer o uso de equipamentos do mesmo fabricante para facilitar o serviço de manutenção ou caso seja necessário a substituição ou remoção do mesmo, o rearranjo dos módulos seriam mais simples de ser realizado, visto que as características elétricas dos equipamentos seriam idênticas.

Figura 17 - Opções de inversores para o gerador FV formado por módulos FV da marca Jinko Solar.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Inversor	41 x STP 60-10 1 x STP 60-10	35 x SHP75-10 1 x STP 60-10	38 x SHP75-10 2 x STP 20000TL-30
Estado	✓	✓	✓
Módulos FV	9036 x JinkoSolar Holding Co. Ltd. JKM-315P-72 (4BB) (05/2016)	9036 x JinkoSolar Holding Co. Ltd. JKM-315P-72 (4BB) (05/2016)	9036 x JinkoSolar Holding Co. Ltd. JKM-315P-72 (4BB) (05/2016)
Quantidade total de módulos FV	9036	9036	9036
Potência de pico	2,85 MWp	2,85 MWp	2,85 MWp
Número de inversores fotovoltaicos	42	36	40
Potência nominal CA dos inversores fotovoltaicos	2,52 MW	2,69 MW	2,89 MW
Potência activa CA	2,52 MW	2,69 MW	2,89 MW
Relação de potência activa	88,5 %	94,3 %	101,5 %
Rendimento energético anual	4.682,95 MWh	4.688,75 MWh	4.691,12 MWh
Factor de utilização da energia	99,8 %	99,9 %	99,9 %
Rácio de desempenho	84,7 %	84,7 %	84,6 %
Rendimento energético espec.	1645 kWh/kWp	1647 kWh/kWp	1648 kWh/kWp
Perdas em linha (em % de energia FV)	---	---	---
Carga desequilibrada	0,00 VA	0,00 VA	0,00 VA

Fonte: *Sunny Design*.

3.2 Software PV*SOL

O programa PV*SOL foi criado pela empresa alemã *Valentin Software*. A empresa desenvolve ferramentas computacionais capazes de dimensionar e simular detalhadamente sistemas de energia utilizando fontes alternativas, como o fotovoltaico, térmica e sistemas de bomba de calor. É possível projetar o sistema em 3D, facilitando a análise de sombreamento e irradiação solar em qualquer período. Além disso, o programa realiza uma análise econômica, apresentando ao usuário o retorno financeiro do projeto. Nas seções seguintes, será apresentado detalhadamente os itens que serão utilizados para a execução do presente trabalho.

A aquisição do *software* é privada, porém é permitido o uso durante 30 dias da versão de teste, disponibilizando todos os itens da versão paga.

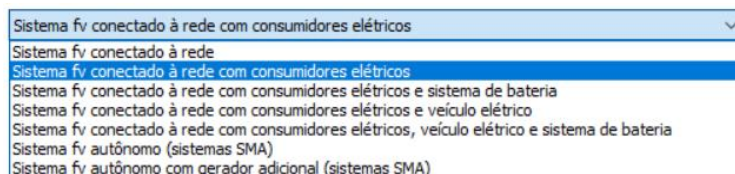
3.2.1 Definição do tipo de sistema, clima e rede

Primeiramente, deve-se criar um novo projeto assim que o programa é aberto. Há áreas para inserir dados do responsável pela elaboração do projeto, do cliente e uma descrição do projeto, sendo possível incluir uma imagem do local onde será instalado o sistema FV. Essa última opção é oferecida pelo programa para realizar a modelagem do sistema em 3D. Esse item é

interessante para modelar o local do projeto, facilitando a análise de sombras devido às estruturas ao redor.

Assim, a próxima etapa é indicar o tipo de sistema, isto é, se o mesmo é conectado à rede ou funcionará isoladamente, como visto na Figura 18.

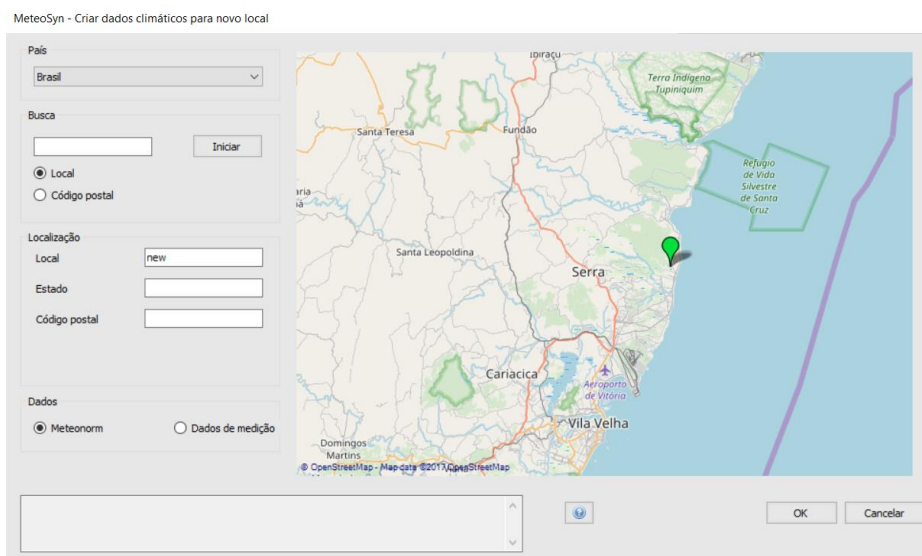
Figura 18 - Tipos de sistema disponíveis no PVSOL Premium.



Fonte: PV*SOL.

Após configurar o tipo do sistema, deve-se inserir dados relativos ao clima do local e à rede elétrica que esse estará conectado. O programa utiliza dados meteorológicos da Meteonorm, cabendo o usuário apenas selecionar o local de instalação através de uma lista. Caso o local de interesse não esteja disponível na lista, deve-se criar um novo local, sendo necessário identificá-lo no mapa, como mostra a Figura 19. No campo “dados”, há duas opções: Meteonorm e dados de medição. A primeira consiste em o programa interpolar os valores obtidos da Meteonorm e assim, completar os dados do novo local. Já a segunda, o usuário deve inserir a irradiação global e a temperatura média mensal medidas no período de um ano.

Figura 19 - Criando um novo local no PV*SOL.



Fonte: PV*SOL.

3.2.2 Caracterização do perfil de carga

O software PV*SOL, assim como o *Sunny Design*, fornece uma lista de opções de perfil de carga, sendo possível alterar o valor de consumo anual pré-estabelecido. O programa também permite que o usuário adicione um novo perfil na lista, inserindo dados de consumo de energia. Entretanto, só é possível o uso dessa área caso haja valores de demanda ou consumo de um período de um ano (365 ou 366 dias), como observado na Figura 20.

Figura 20 - Opção de importar dados de demanda ou consumo.

Importar curva de carga

Nome

Comentário

Intervalo de tempo 15 Min

Quantidade de dias 365

Quantidade de valores 35040

Unidade dos valores kW

Formato numérico arquivo ####,##

Arquivo

Carregar valores Fechar

Fonte: PV*SOL.

Outra maneira de caracterizar o perfil do cliente é inserir dados reais de consumo, sendo necessário valores de um dia útil e do final de semana para cada estação do ano. Dessa forma, a curva de carga traçada é muito próxima da realidade e o programa realiza o dimensionamento que conseguirá atender da melhor forma o cliente com base no seu perfil de consumo diário. Além das opções citadas, a unidade consumidora pode ser caracterizada detalhadamente inserindo cargas existentes nela, como lâmpadas fluorescentes, máquina de lavar, geladeira com freezer, aspirador de pó, entre outros equipamentos elétricos, além de ser possível adicionar novos itens à lista. Essa ferramenta é bastante útil para caracterizar unidades menores, como apartamentos ou comércios de pequeno e médio porte.

Outra alternativa fornecida pelo programa é a inserção de valores de consumo de energia mensal no período de um ano.

3.2.3 Configuração do gerador FV

O programa fornece uma lista imensa de modelos de vários fabricantes de módulos FV, mas vale citar que o PV*SOL permite adicionar modelos de módulos FV que não existam em seu banco de dados. Para isso, é necessário obter as especificações elétricas e construtivas do módulo, como a seguir: fabricante, tipo de célula utilizada e sua quantidade por módulo, número de diodos de desvio, grandezas mecânicas (dimensão e peso), tensão e corrente, coeficiente de temperatura, entre outros.

Após a escolha do módulo que vai compor o gerador FV, o programa oferece a opção de inserir a quantidade de módulos, retornando a potência total gerada em kWp, ou vice-versa. É possível também determinar a porcentagem de geração em relação ao consumo, escolhendo o período considerado, podendo ser um ano, um mês qualquer ou o pior mês de energia solar incidida no local. A Figura 21 mostra a interface encontrada nesta etapa.

Figura 21 - Configuração do gerador FV.

The screenshot displays the 'Módulos fotovoltaicos' (Photovoltaic Modules) configuration window in the PV*SOL software. The interface includes a sidebar on the left with options like 'Área do módulo 1', 'Sombreamento', and 'Degradação do módulo'. The main area contains several input fields and checkboxes:

- Empresa** (Company): Canadian Solar Inc.
- Modelo** (Model): CS6U-340M
- ☐ Seleção apenas dos favoritos
- ☐ Photo Plan - Previsão fotográfica da cobertura do telhado
- ☐ Ocupação gráfica
- Número de módulos** (Number of modules): 10
- 3,40 kWp** (Total power)
- [Calcular em relação ao consumo](#) (Calculate in relation to consumption)
- Situação de montagem** (Mounting situation): Paralelo ao telhado - boa ventilação
- Rastreamento** (Tracking): Nenhum
- Inclinação** (Tilt): 30°
- Orientação** (Orientation): 180°
- A compass rose indicates the orientation is 180° (Azimute 180°).

Fonte: PV*SOL.

Podemos observar também que deve ser incluído a situação de montagem do módulo, sendo ele instalado paralelamente ao telhado, permitindo uma boa ventilação traseira, integrado no telhado com ou sem ventilação traseira, montado em um telhado plano com estruturas para suporte e inclinação ou instalado em uma área que haja espaço livre ao redor. A inclinação e o sentido que o módulo está apontando são informações que também devem ser inseridas.

Caso o suporte utilizado não seja fixo, isto é, seja capaz de se movimentar para melhor captação dos raios solares, deve ser informado no item “rastreamento”.

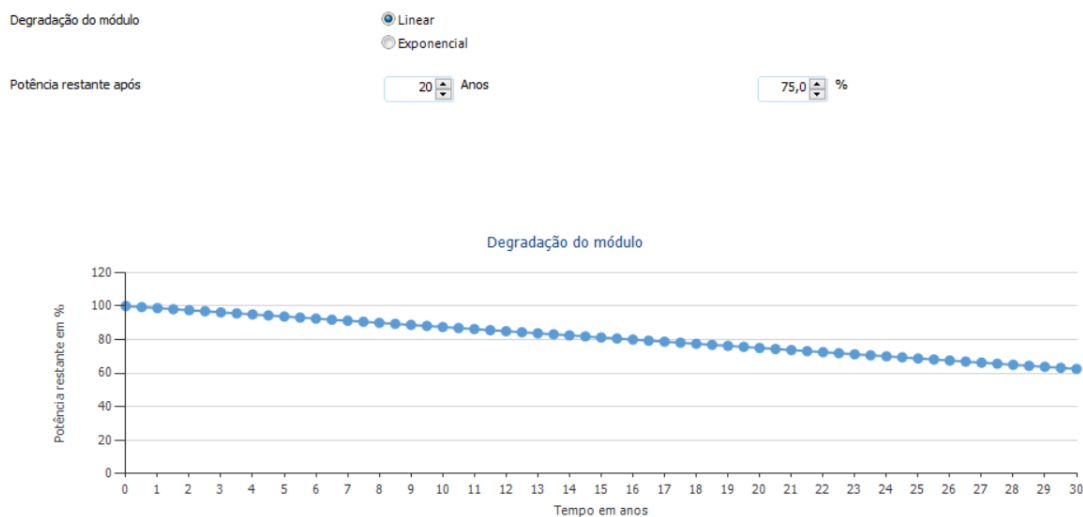
3.2.3.1 Sombreamento

O nível da irradiação solar média anual em uma área pode ser reduzido devido ao sombreamento, alterando o desempenho da conversão e assim, diminuindo a produção de energia elétrica. O sombreamento pode ser considerado no projeto de duas formas: inserindo a porcentagem anual de sombra que o local está sujeito ou definindo valores do ângulo horizontal (azimute) e seu respectivo ângulo de altura. Esses parâmetros podem ser obtidos com o uso de um compasso e um transferidor com um indicador de caminho do Sol.

3.2.3.2 Degradação do módulo

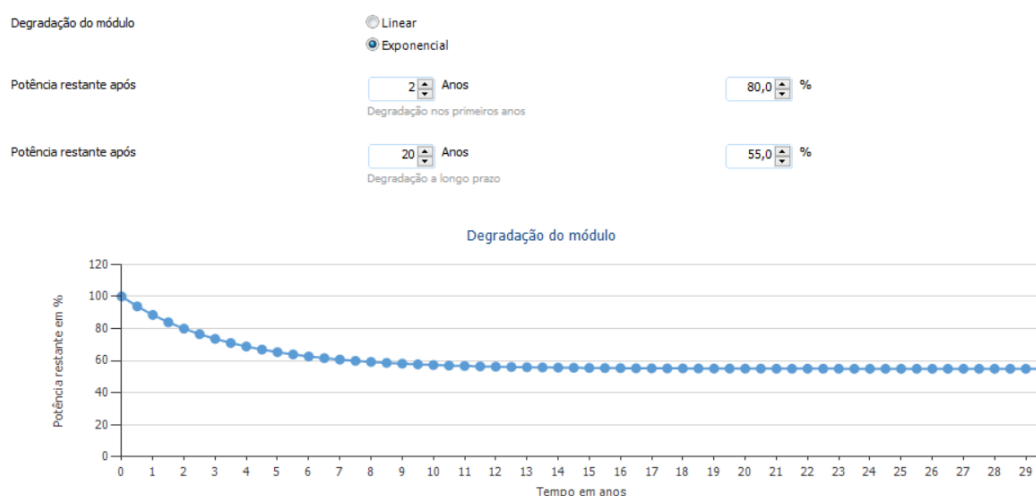
Há uma influência do tempo de utilização do módulo FV com seu desempenho. A degradação pode ser estimada de modo linear ou exponencial ao longo do tempo, indicando a potência gerada (em porcentagem) após determinado tempo (em anos), como observado nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 - Exemplo do comportamento da potência considerando uma degradação linear.



Fonte: PV*SOL.

Figura 23 - Exemplo do comportamento da potência considerando uma degradação exponencial.



Fonte: PV*SOL.

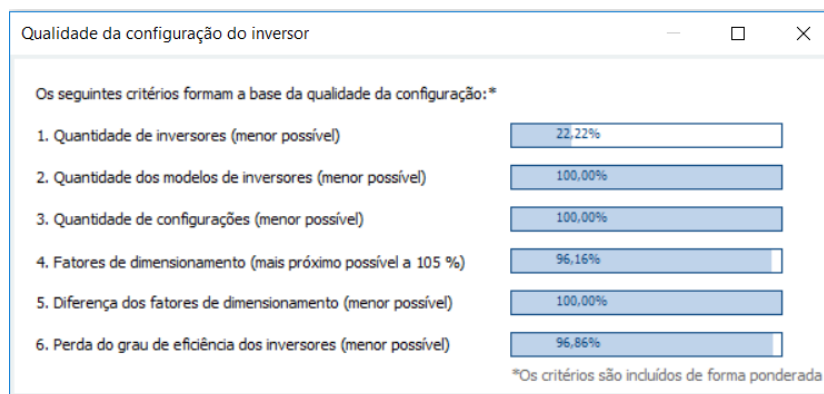
3.2.4 Escolha do inversor

O programa disponibiliza uma grande variedade de modelos de inversores. Caso necessário, é permitido ao usuário adicionar novos modelos que não estejam listados, apenas preenchendo seus dados técnicos no espaço indicado pelo programa.

É possível selecionar mais de um modelo de inversor e deve ser indicado a quantidade de modelos diferentes desejados na configuração final. Além disso, pode-se definir alguns critérios para o cálculo de dimensionamento, como o limite do FDI, permitir ou não MPPT livres e ocupar ao máximo os rastreadores ou balanceá-los.

O resultado de dimensionamento é apresentado em forma de uma lista, disponibilizando todas as possibilidades de configuração ou optar pelo programa propor a melhor configuração considerada por ele. Este leva em consideração os itens selecionados pelo usuário, buscando o menor número possível de inversores, o melhor modelo dentre os selecionados e a maior taxa de qualidade de dimensionamento. Essa taxa é um resultado ponderado dos critérios apresentados na Figura 24.

Figura 24 - Exemplo de resultado de critérios de qualidade do dimensionamento.



Fonte: PV*SOL.

Após a escolha da configuração, são apresentados os números de módulos FV conectados em cada MPPT, dando liberdade de alteração, caso o usuário deseje, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Resultado do dimensionamento de inversor para determinada quantidade de módulos FV.



Fonte: PV*SOL.

3.3 Software PVsyst

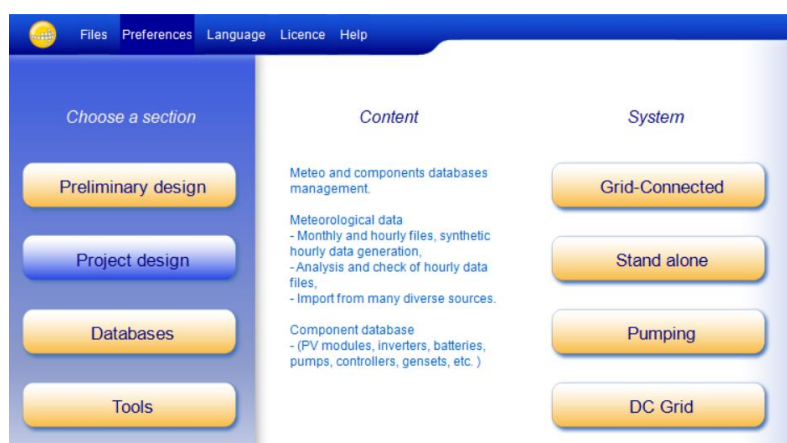
O *software* PVsyst foi criado pela companhia suíça PVsyst SA, cuja atividade é o desenvolvimento e comercialização de ferramentas computacionais para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados ou conectados à rede elétrica.

O programa fornece uma documentação completa, com instruções e explicações sobre os diversos itens disponíveis para o usuário. Ao final do arquivo de ajuda, são apresentadas

referências bibliográficas utilizadas pelos desenvolvedores, sendo documentos acadêmicos, pesquisas e artigos científicos.

O programa realiza um pré-dimensionamento na opção “*preliminary design*”, conforme mostrado na Figura 26, sendo apenas uma avaliação básica e simplificada do sistema que se deseja projetar. Com base nos dados de local de instalação, consumo anual do cliente e área disponível, o programa retorna, de forma resumida, a porcentagem de energia perdida devido ao posicionamento dos painéis FV e do material a ser utilizado. Além disso, este realiza uma avaliação econômica simples, retornando o total de investimento e o custo da energia gerada, desconsiderando impostos e taxas. Para resultados mais precisos, é recomendado utilizar a opção “*project design*”, que será detalhado a seguir.

Figura 26 - Tela inicial do programa PVsyst.



Fonte: PVsyst.

3.3.1 Definição do tipo de sistema e localização

Há quatro tipos de sistema FV para dimensionamento: conectado à rede CA ou CC, isolado e bombeamento de água. Como este trabalho aborda um projeto de sistema FV conectado à rede CA, será apresentado os detalhes do programa apenas para esse assunto.

Os dados meteorológicos analisados pelo *software* são a quantidade de irradiação solar direta e difusa, a temperatura ambiente média e a velocidade média do vento no local, sendo todas as grandezas mensais. Tais valores podem ser manualmente inseridos, caso o usuário tenha conhecimento. A Figura 27 ilustra a lista que deve ser preenchida.

Figura 27 - Configuração de um novo local.

	Global Irrad. kWh/m².mth	Diffuse kWh/m².mth	Temper. °C	Wind Vel. m/s
January	0.0	0.0	0.0	0.00
February	0.0	0.0	0.0	0.00
March	0.0	0.0	0.0	0.00
April	0.0	0.0	0.0	0.00
May	0.0	0.0	0.0	0.00
June	0.0	0.0	0.0	0.00
July	0.0	0.0	0.0	0.00
August	0.0	0.0	0.0	0.00
September	0.0	0.0	0.0	0.00
October	0.0	0.0	0.0	0.00
November	0.0	0.0	0.0	0.00
December	0.0	0.0	0.0	0.00
Year	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: PVsyst.

Outra alternativa é importar dados de websites que trabalhem com medições e obtenham as informações desejadas, como a National Aeronautics and Space Administration – NASA e a Meteonorm. O próprio *software* traz várias opções de fontes de dados, sendo algumas mais atualizadas ou de localidade específica.

3.3.2 Orientação dos módulos FV

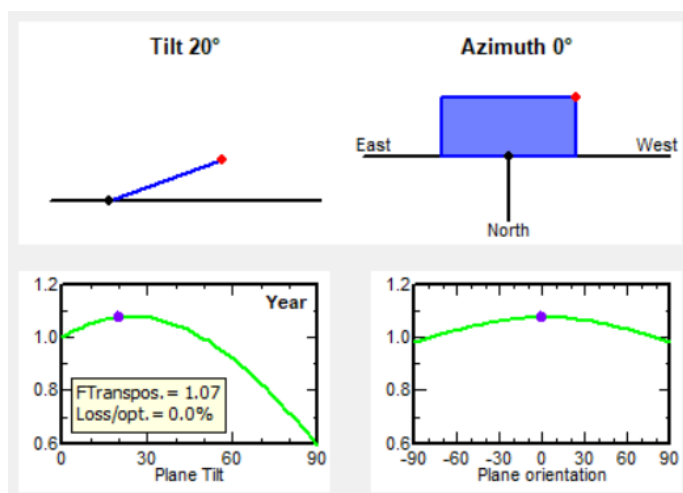
O ângulo de inclinação e o sentido que o módulo FV aponta são considerados no cálculo de energia gerada no sistema e podem ser indicados na área apresentada pela Figura 28.

Figura 28 - Orientação do módulo FV.

Fonte: PVsyst.

Nesta etapa, ocorre a otimização da posição do módulo FV, isto é, após o usuário inserir o ângulo e o sentido de inclinação, o programa apresenta a razão da quantidade de irradiação solar incidente no módulo e a incidente na horizontal. Essa medida indica o ganho ou a perda quando o módulo se encontra inclinado no ângulo inserido. A Figura 29 exemplifica essa etapa.

Figura 29 - Otimização da posição do módulo FV.



Fonte: PVsyst.

3.3.3 Definição do gerador FV

O banco de dados do *software* é rico em diversidade, assim como o PVSOL. Assim, é fácil encontrar o modelo desejado para simular o dimensionamento. Entretanto, o usuário é livre para contribuir com novos modelos, tanto de módulos FV como de inversores, precisando apenas possuir os parâmetros técnicos necessários.

A quantidade de módulos do gerador é determinada pelo programa. Para isso, o autor do projeto deve definir o modelo do módulo que deseja utilizar e a potência produzida planejada ou a área disponível do local.

É possível adicionar até oito geradores para o mesmo sistema, ou vários sub-arrays, como é chamado pelo *software*. Assim, a quantidade de módulos instalados no canto direito e esquerdo em um telhado, por exemplo, poderiam ser especificados separadamente. Esse item é interessante para o projeto deste trabalho, já que envolve nove telhados distintos, porém com as mesmas características de localização e sistema.

3.3.4 Definição do inversor

Como citado na seção anterior, o *software* fornece modelos de inversores de diversos fabricantes, sendo possível também a inserção de novos itens pelo usuário.

Assim que o gerador FV e o modelo de inversor são definidos, o programa calcula a quantidade de inversores necessários para tal sistema. Diferente dos dois *softwares* apresentados, o PVsyst não retorna outras sugestões de configuração utilizando outros modelos, apenas permitindo a edição do único resultado, ficando a cargo do usuário de alterar a quantidade de módulos associados em série e o número de strings conectados em cada MPPT. Vale destacar que o programa não fornece um resultado detalhado como nos programas anteriores, sendo fornecida apenas a quantidade total de strings e a quantidade de módulos em uma string, ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Resultado de dimensionamento do inversor para um determinado gerador FV.

Select the inverter

Available Now: SMA 50 kW 500 - 800 V TL 60 Hz Sunny Tripower CORE1

Nb. of inverters: 3

Operating Voltage: 500-800 V Global Inverter's power: 150 kWac

Input maximum voltage: 1000 V Inverter with 12 MPPT

☐ Use multi-MPPT feature

Design the array

Number of modules and strings

Mod. in series: 18 (between 16 and 19)

Nbre strings: 27 (between 25 and 29)

Overload loss: 0.0 %

Pnom ratio: 1.10

Nb. modules: 486 Area: 945 m²

Operating conditions

Vmpp (60°C): 581 V

Vmpp (20°C): 637 V

Voc (-10°C): 929 V

Plane irradiance: 1000 W/m²

Imp (STC): 243 A

Isc (STC): 256 A

Isc (at STC): 256 A

Max. operating power at 1000 W/m² and 50°C: 148 kW

Array nom. Power (STC): 165 kWp

Fonte: PVsyst.

À medida que ocorre uma mudança na configuração, o programa notifica o estado do dimensionamento, isto é, se está de acordo com as especificações elétricas dos equipamentos. O dimensionamento resultante apresenta o FDI de cada sub-array, avisando quando o inversor está sub ou sobredimensionado e essa faixa pode ser ajustada de acordo com os valores que o responsável julgar conveniente.

3.3.5 Detalhe das perdas de potência

Para a execução do dimensionamento do sistema FV, o programa considera em seus cálculos as perdas de potência que o módulo pode sofrer durante seu funcionamento. Segundo o PVsyst,

a eficiência do módulo pode ser diferente do que o fabricante propõe e esse parâmetro pode ser indicado em forma de perda de qualidade no campo “module quality”, ilustrado na Figura 31. A outra causa de perda de energia gerada é o fato das células do módulo ou o arranjo de módulos não possuírem rigorosamente a mesma característica elétrica, ou seja, não são 100% idênticos. Apesar de serem fabricadas com os mesmos componentes, seus parâmetros de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e potência máxima podem sofrer alterações quando construídos. Como são ligados eletricamente, a menor corrente produzida será o que circulará na string inteira.

Além disso, o programa considera a degradação do módulo de silício monocristalinos devido ao seu funcionamento nas primeiras horas.

A degradação do módulo também é levada em consideração nos cálculos de perda da eficiência na conversão de energia, ressaltando que cada célula ou cada módulo sofrem deterioração em tempos diferentes. As Figura 31 e 32 apresentam as áreas a serem preenchidas de acordo com o conhecimento do responsável.

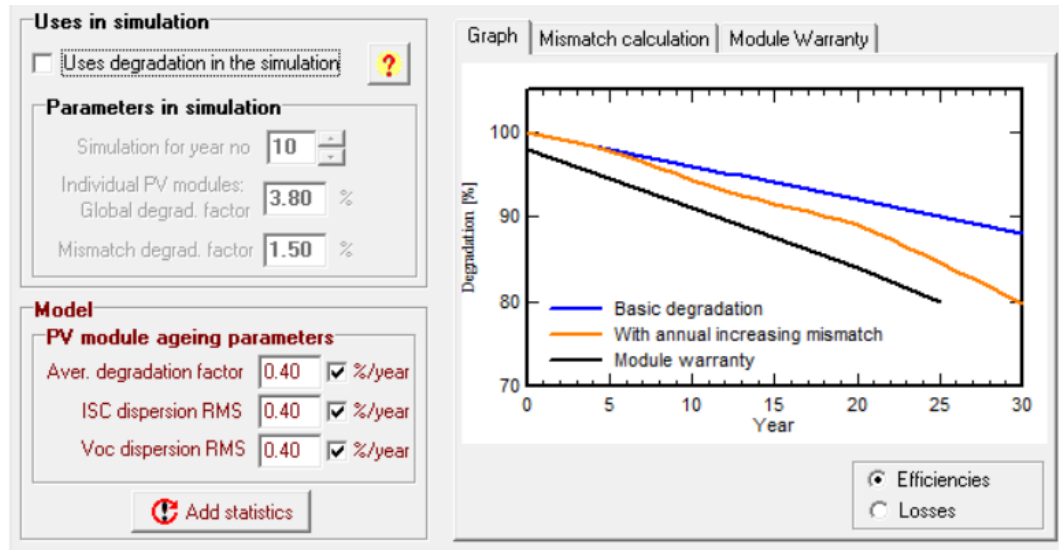
Figura 31 - Perda da qualidade dos módulos FV.

The image shows a screenshot of the PVsyst software interface, specifically the 'Module quality' and 'Modules mismatch losses' sections. The interface is divided into four panels:

- Module quality:** Contains a 'Module efficiency loss' input field set to -0.4%, with a 'default' checkbox checked. Below it, a text box explains: 'Deviation of the average effective module efficiency by respect to manufacturer specifications. (negative value indicates over-performance)'. A yellow question mark icon is present.
- Modules mismatch losses:** Contains two input fields: 'Power Loss at MPP' set to 1.0% (checkbox unchecked) and 'Loss when running at fixed voltage' set to 2.5% (checkbox checked). A text box below states: 'Not relevant when MPPT operation'. A 'Detailed computation' button and a yellow question mark icon are at the bottom.
- LID - Light Induced Degradation:** Contains an 'LID loss factor' input field set to 0.0%, with a 'default' checkbox unchecked. A text box below explains: 'Degradation of crystalline silicon modules, in the first operating hours by respect to the manufacturing flash test STC values.' A yellow question mark icon is present.
- Strings voltage mismatch:** Contains a 'Power Loss at MPP' input field set to 0.1%, with a 'Default' checkbox checked. A 'Detailed study' button and a yellow question mark icon are at the bottom.

Fonte: PVsyst.

Figura 32 - Desempenho do sistema em relação a degradação do módulo FV.



Fonte: PVsyst.

4 CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA

Será realizado o dimensionamento do sistema fotovoltaico pelo método analítico e assim, utilizando os três programas computacionais apresentados anteriormente. Para isso, é necessário iniciar o projeto com a caracterização do consumidor, como é apresentado a seguir.

4.1 Características da planta e consumo

O dimensionamento do sistema fotovoltaico será elaborado para atender a demanda parcial de uma empresa cuja atividade é o beneficiamento de granito e mármore. A empresa está localizada no bairro de Jacaraípe, no município da Serra, no Espírito Santo. Trata-se de um consumidor do Subgrupo A3a, com fornecimento de tensão de 34,5 kV e é aplicada a Modalidade Tarifária Horária Verde pela concessionária de energia. A área administrativa é alimentada com tensão de 220V, ao passo que a área industrial é alimentada em 380 V.

O consumo de energia mensal no período de Novembro de 2016 a Outubro de 2017 pode ser visto na Tabela 1. Percebe-se que houve um aumento significativo do consumo a partir de Março de 2017. Isso se deve ao fato de que a indústria sofreu uma ampliação na sua linha de produção, contando com o funcionamento de dois novos galpões nessa data.

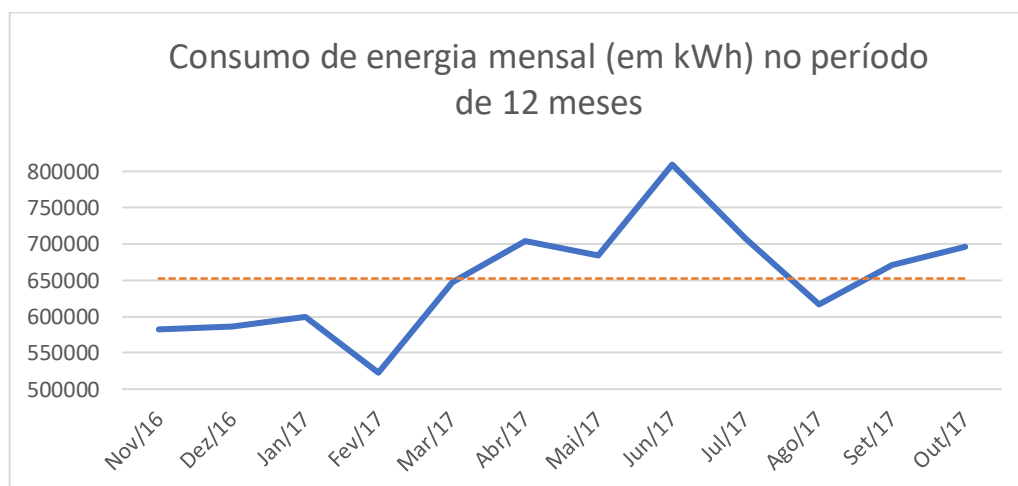
Tabela 1 - Consumo mensal de energia da empresa.

Mês	Consumo (kWh)
Nov/16	582.044,96
Dez/16	585.766,72
Jan/17	599.807,04
Fev/17	522.625,60
Mar/17	647.703,84
Abr/17	704.636,10
Mai/17	684.821,03
Jun/17	809.431,88
Jul/17	707.713,65
Ago/17	616.462,88
Set/17	671.509,13
Out/17	696.036,60

Fonte: Próprio autor.

O consumo de energia mensal considerando esse período de 12 meses é ilustrado no Gráfico 1, indicado pela curva azul. Já a média do período está representado pela curva laranja, sendo seu valor de 652.379,95 kWh.

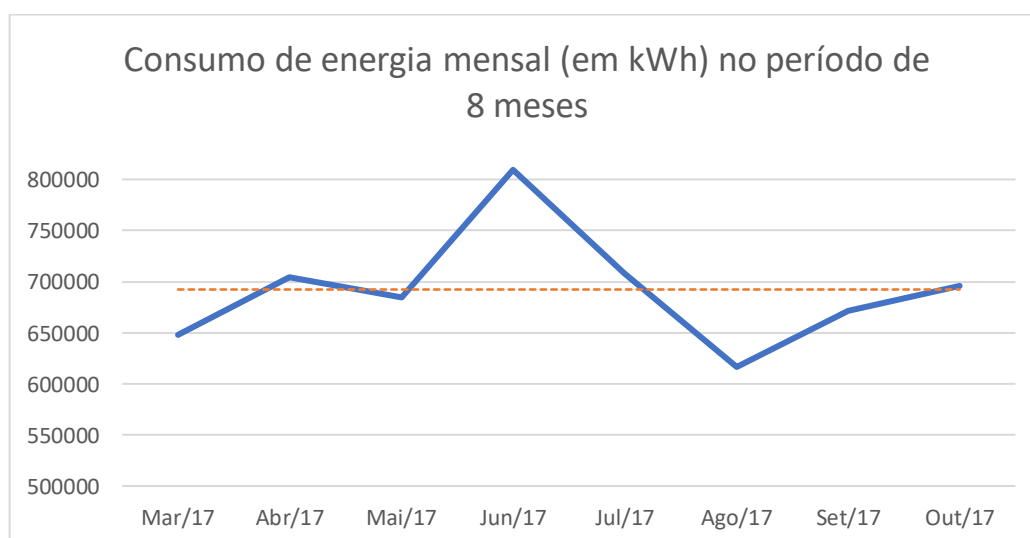
Gráfico 1 - Consumo de energia mensal no período de Novembro de 2016 a Outubro de 2017



Fonte: Próprio autor.

Como houve um aumento da carga a partir de Março de 2017, desconsideramos o consumo anterior a essa data e realizamos a análise de consumo a partir do mesmo. Apesar de ser um período de apenas 8 meses, a variação dos valores de consumo de energia são menos acentuados, como mostra o Gráfico 2, em comparação com o Gráfico 1.

Gráfico 2 - Consumo de energia mensal no período de Março de 2017 a Outubro de 2017.



Fonte: Próprio autor.

Desse modo, o consumo médio mensal torna-se mais fiel a atual situação da empresa. Seu valor médio mensal é representado pela curva laranja no gráfico anterior com valor de 692.289,39 kWh, o que resulta em uma média diária de 23.076,31 kWh

4.2 Radiação solar no local

É de essencial importância verificar o nível de radiação solar do local a ser instalado o sistema fotovoltaico, já que é a fonte que vai ser convertida em energia elétrica.

A empresa está localizada no município da Serra, no estado de Espírito Santo nas coordenadas geográficas 20,12° Sul e 40,19° Oeste. Os dados de irradiação solar nesse local podem ser obtidos através do programa SunData desenvolvido pelo CRESESB .

Utilizando o programa, foram obtidos valores de irradiação solar diária média mensal na região próxima ao local de interesse, visto que as coordenadas de entrada não estavam listadas no banco de dados do SunData. A região próxima é a cidade de Vitória, 25,3 km distante do local de interesse, com latitude de 20,3° Sul e 40,34° Oeste. A Tabela 2 mostra os valores de cada mês no plano horizontal e no plano de inclinação igual a latitude do local, porém no sentido Norte.

Tabela 2 - Irradiação solar diária média mensal em kWh/m²/dia.

Ângulo de inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0° N	6,14	5,97	5,5	4,56	4,17	3,67	3,89	4,53	4,31	5,11	5	5,67
20° N	5,58	5,7	5,62	5,05	5,01	4,56	4,76	5,2	4,51	4,99	4,64	5,11

Fonte: SunData.

Pode-se perceber valores maiores de irradiação solar na superfície com inclinação do local durante a maior parte do ano. Além disso, segundo a recomendação de FERNANDES, SOUZA; MOREIRA (2015), para obter o maior nível de irradiação solar possível, os módulos fotovoltaicos devem ser instalados com certa inclinação dependendo da latitude local, como pode ser vista na Tabela 3.

Assim, optou-se pela instalação dos módulos fotovoltaicos com inclinação igual a latitude do local, porém voltada para o Norte (20 ° Norte). Além disso, a instalação dos módulos com um

ângulo de inclinação evitará um maior acúmulo de sujeira e poeira em comparação com uma instalação no plano horizontal, prejudicando consideravelmente o sistema.

Tabela 3 - Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos para cada latitude local.

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: FERNANES, SOUZA e MOREIRA, (2015).

4.3 Área disponível para instalação do sistema

Foi escolhido o espaço para instalação dos módulos fotovoltaicos. Como o objetivo principal é utilizar o vasto espaço já existente da empresa sem obstruir o acesso de pessoas e passagem de transportes de cargas grandes e pesadas, com risco de colisões entre painéis fotovoltaicos e chapas ou blocos de granito, optou-se por utilizar o telhado dos nove galpões da indústria, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensão do telhado de cada galpão da indústria.

Galpão	Comprimento (m)	Largura (m)	Área total (m ²)
G1	152,32	8,33	1268,29
G2	78,85	4,87	383,92
G3	222,45	13,15	2925,17
G4	222,45	10,04	2233,97
G5	222,45	9,95	2213,64
G6	222,45	11,95	2657,50
G7	221,40	15,05	3331,76
G8	110,00	25,39	2792,42
G9	110,00	25,39	2792,42

Fonte: Próprio autor.

Os módulos fotovoltaicos devem ser agrupados em arranjos e serem instalados em cada telhado. A quantidade de módulos por telhado depende do tamanho do módulo escolhido, a área do telhado, a massa do painel e o limite de peso que o telhado suporta. Neste trabalho, serão consideradas apenas as dimensões do telhado e do módulo fotovoltaico.

5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O dimensionamento do sistema fotovoltaico será desenvolvido pelo método analítico e pelos três programas computacionais apresentados no Capítulo 3.

5.1 Método analítico

O método analítico será realizado seguindo os procedimentos sugeridos por PINHO e GALDINO (2014), sendo eles a avaliação do recurso solar do local de instalação do sistema, a temperatura ambiente e a análise das características elétricas de módulos FV e inversores que possam atender o projeto.

5.1.1 Dados de irradiação solar

Para elaborar o dimensionamento do sistema fotovoltaico através do método analítico, deve-se, inicialmente, levantar dados relativos à incidência solar da área de instalação para saber a quantidade de energia disponível por metro quadrado, etapa realizada na Seção 4.2.

Os telhados existentes na empresa possuem suas faces voltadas para o Norte e para o Sul geográfico. A captação de energia solar no hemisfério Sul é maior quando a superfície está orientada para o Norte geográfico (MARINOSKI; SALAMONI; RUTHER, 2004). Assim, serão utilizados apenas as faces de telhado voltadas para o Norte geográfico, e assim, maximizar a produção média diária de energia.

5.1.2 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

O próximo passo é escolher os módulos fotovoltaicos, avaliando as características elétricas, como a capacidade de geração e a eficiência. O módulo escolhido para o projeto será do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U-340M, cuja algumas características elétricas são apresentadas na Figura 32. Outras informações são encontradas na folha de dados do módulo, apresentada no Anexo A.

Figura 33 - Características elétricas do módulo FV escolhido.

ELECTRICAL DATA | STC*

CS6U	330M	335M	340M	345M
Nominal Max. Power (Pmax)	330 W	335 W	340 W	345 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.5 V	37.8 V	37.9 V	38.1 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.80 A	8.87 A	8.97 A	9.06 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.9 V	46.1 V	46.2 V	46.4 V
Short Circuit Current (Isc)	9.31 A	9.41 A	9.48 A	9.56 A
Module Efficiency	16.97%	17.23%	17.49%	17.74%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

Fonte: Folha de dados do módulo fotovoltaico Canadian Solar.

Para o máximo aproveitamento do espaço disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos, foi elaborado um código no programa Matlab que retornasse o melhor arranjo dos módulos, ou seja, a posição que eles seriam agrupados e assim, avaliar a energia produzida quantitativamente em cada caso. O código em linha pode ser visto no Anexo B. Foram considerados dois aspectos, como segue abaixo.

- Agrupar até seis módulos por painel para que todos os módulos sejam acessados lateralmente;
- Considerar um espaço lateral de 500 mm entre os painéis, para eventual passagem de pessoas (realização de manutenção, limpeza, entre outros serviços) e 100 mm na vertical.

Assim, o programa desenvolvido calcula a quantidade de módulos que poderiam ser instalados no telhado de cada galpão de acordo com o arranjo especificado, dimensão do galpão e do módulo. Obtido a quantidade de módulos em cada situação, calcula-se a energia gerada por esse sistema, utilizando a Equação (1).

$$E_g = n \times I \times A \times \eta \quad (1)$$

Onde

E_g é a energia gerada pelo conjunto dos módulos fotovoltaicos em kWh/dia;

n é quantidade de módulos fotovoltaicos no telhado;

I é a irradiação solar média mínima do local da instalação em kWh/m²/dia;

A é a área do módulo fotovoltaico em m²;

η é o rendimento do módulo fotovoltaico.

Observa-se que é utilizada a irradiação solar média mínima do local, tendo como base o método do Mês Crítico. Segundo o método, o projeto do sistema fotovoltaico considera o valor médio de irradiação solar do período do ano que ocorrem as condições mais desfavoráveis para o sistema e assim, se o sistema funcionar nessa situação crítica, ocorrerá também para outros períodos, produzindo mais energia nas condições mais favoráveis (PINHO; GALDINO, 2014). O valor de irradiação solar média mínima pode ser encontrado na Tabela 2, da seção 5.2. O menor valor encontrado foi no mês de Setembro, sendo 4,51 kWh/m²/dia no plano inclinado de 20° Norte.

Assim, utilizando o código desenvolvido e a equação (1), foram obtidas para cada galpão a energia gerada e a quantidade de módulos utilizados, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Energia gerada em cada galpão em kWh/dia.

Galpão	Energia gerada (kWh/dia)	Número de módulos
G1	791,38	516
G2	220,85	144
G3	1741,98	1224
G4	1407,92	918
G5	1380,31	900
G6	1564,35	1020
G7	2190,10	1428
G8	1877,22	1224
G9	1877,22	1224
TOTAL	13051,33	8598

Fonte: Próprio autor.

Utilizando o modelo CS6U-340M, será produzido 13051,33 kWh por dia, isto é, supriria 56,55% da energia consumida na indústria.

5.1.3 Dimensionamento do inversor

Nesta etapa, deve-se escolher o modelo de inversor adequado à quantidade de módulos fotovoltaicos determinado para o projeto. Para isso, foram levados em consideração a tensão de entrada que este suporta, a faixa de operação do MPPT, a corrente máxima admitida na entrada e o Fator de Dimensionamento do Inversor – FDI.

O modelo de inversor escolhido para o dimensionamento será da marca SMA, modelo STP 50-40, cuja algumas especificações elétricas retiradas da folha de dados do equipamento (Anexo C) podem ser observadas na Figura 33. Percebe-se que esse modelo possui seis entradas de MPPT, e em cada entrada são permitidas duas strings (arranjos de módulos FV associados em série), o que torna o sistema mais eficiente, pois na ocorrência de alguma falha, existência de sombreamento ou sujeira ou outros fatores que prejudicam o bom desempenho do módulo FV, apenas o arranjo de uma das entradas sofrerá as consequências, deixando o arranjo de outro MPPT em boas condições de funcionamento.

Assim, serão analisados os quatro fatores citados no início da seção para determinar a quantidade necessária de inversores para o projeto.

Figura 34 - Especificações elétricas do inversor STP 50-40.

Technical Data	Sunny Tripower CORE1
Input (DC)	
Max. generator power	75000 Wp STC
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	500 V to 800 V / 670 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V
Max. operating input current / per MPPT	120 A / 20 A
Max. short circuit current per MPPT / per string input	30A / 30A
Number of independent MPPT inputs / strings per MPP input	6 / 2
Output (AC)	
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	50000 W
Max. apparent AC power	50000 VA
AC nominal voltage	220 V / 380 V 230 V / 400 V 240 V / 415 V
AC voltage range	202 V to 305 V
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current / Rated output current	72.5 A / 72.5 A
Output phases / AC connection	3 / 3-(N)-PE
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0.0 leading to 0.0 lagging
THD	< 3%

Fonte: Folha de dados do inversor Sunny Tripower CORE1.

5.1.3.1 Tensão de entrada

A tensão de entrada no inversor deve ser a tensão resultante de cada string, ou seja, a associação em série dos módulos fotovoltaicos. Para determinar a quantidade de módulos em cada string, a expressão (2) deve ser obedecida.

$$N_{ms} < \frac{V_{in}}{V_{mod}} \quad (2)$$

Sendo

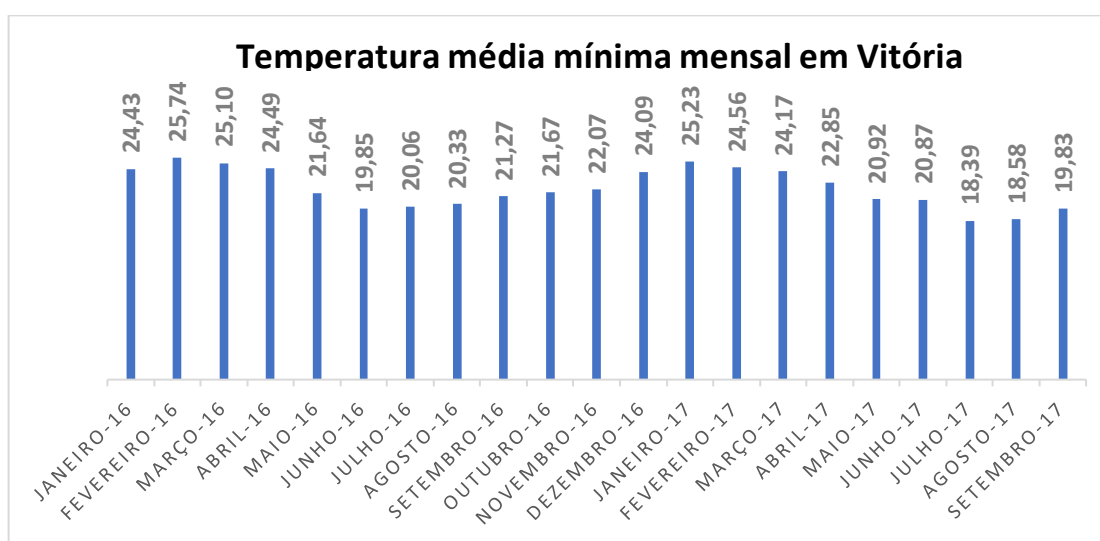
N_{ms} o número de módulos fotovoltaicos associados em série;

V_{in} a tensão de entrada máxima permitida do inversor;

V_{mod} a tensão de saída do módulo fotovoltaico;

Como citado na Seção 2.2.3, quanto maior a temperatura do módulo fotovoltaico, menor será a tensão gerada nos seus terminais. O maior valor de tensão no terminal do módulo será o valor de tensão em circuito aberto em baixas temperaturas. A menor temperatura encontrada na cidade de Vitória, local próximo à região de interesse, pode ser fornecida pelo banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O Gráfico 3 apresenta as temperaturas médias mínimas registradas no período de Janeiro de 2016 a Setembro de 2017.

Gráfico 3 - Temperaturas médias mínimas no período de Janeiro de 2016 à Setembro de 2017.



Fonte: INMET.

De acordo com os dados do gráfico anterior, a temperatura média mínima registrada é 18,39°C no ambiente. Assim, utilizando a Equação (3), foi corrigida a tensão de circuito aberto de acordo com a menor temperatura encontrada. O valor corrigido, apresentado na Tabela 6, será a maior tensão que o módulo fotovoltaico atingirá.

$$X_c = X_{STC} \times (1 + \gamma \times (T - T_{STC})) \quad (3)$$

Onde

X_c é o parâmetro corrigido;

X_{STC} é o parâmetro nas condições padrão de teste;

γ é o coeficiente de temperatura do parâmetro;

T é a temperatura do módulo fotovoltaico na situação de interesse;

T_{STC} é a temperatura do módulo fotovoltaico nas condições padrão de teste.

Tabela 6 - Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico corrigido.

Parâmetro	Coeficiente de Temperatura	Valor Nominal	Valor corrigido	
Voc	-0,31%	46,2	47,15	V

Fonte: Próprio autor.

Como a máxima tensão de entrada suportada pelo inversor é igual a 1000 V, utilizando a expressão (2), a quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em série ao inversor é igual a 21 módulos.

5.1.3.2 Faixa de tensão de operação do MPPT

Como já citado, a temperatura dos módulos fotovoltaicos alteram as grandezas elétricas. Caso a temperatura seja muito elevada, a tensão fornecida pelo arranjo será reduzida, e poderá não ser suficiente para atender o funcionamento do seguidor do ponto de máxima potência (SPMP ou MPPT). Assim, se faz necessário verificar se a quantidade de módulos numa string, cada uma funcionando em seu ponto de máxima potência, vai fornecer uma tensão superior à tensão mínima de operação do MPPT. Seu funcionamento sob tensão menor do que o estabelecido, pode comprometer a eficiência do inversor (PINHO; GALDINO, 2014). Deve ser analisado também o caso de geração da máxima tensão pelo painel FV, afim de que não ultrapasse a tensão máxima de operação do MPPT. Esse último caso será verificado em condições de baixa

temperatura. Assim, para que a quantidade de módulos fotovoltaicos associados em série atenda os requisitos mencionados, ela deve obedecer à Equação (4).

$$\frac{V_{mín_MPPT}}{V_{mp_TmÁx}} < N_{ms} < \frac{V_{mÁx_MPPT}}{V_{mp_Tmín}} \quad (4)$$

Onde,

N_{ms} é a quantidade de módulos fotovoltaicos em série conectados ao inversor;

$V_{mín_MPPT}$ é a tensão mínima CC de funcionamento do MPPT do inversor;

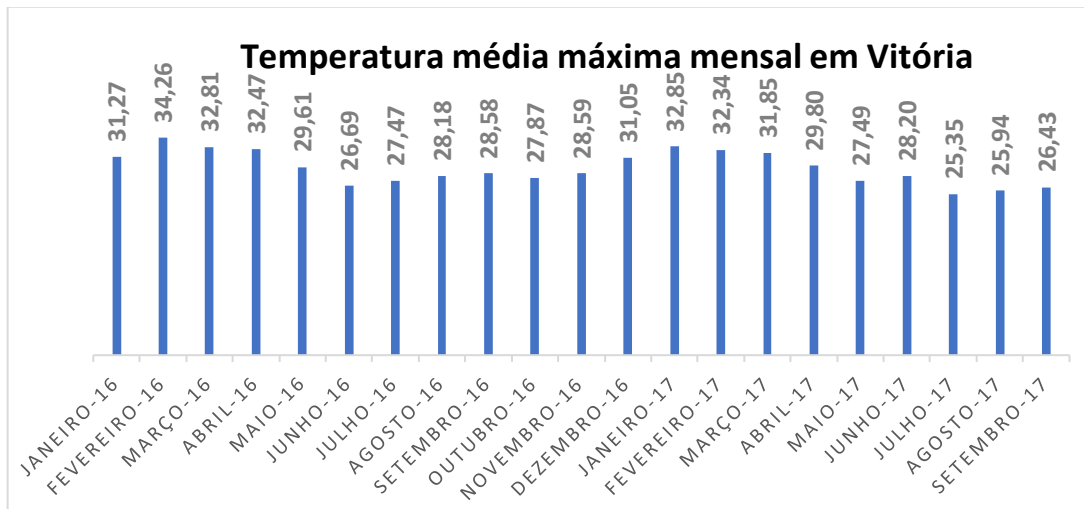
$V_{mÁx_MPPT}$ é a tensão máxima CC de funcionamento do MPPT do inversor.

$V_{mp_Tmín}$ é a tensão do módulo fotovoltaico operando em máxima potência em temperatura ambiente mínima;

$V_{mp_TmÁx}$ é a tensão do módulo fotovoltaico operando em máxima potência em temperatura ambiente máxima.

Para calcular N_{ms} , deve-se inicialmente corrigir os valores de tensão que cada módulo gera no ponto de máxima potência sob a temperatura máxima e mínima do local. De acordo com o Gráfico 3, pode-se observar que a menor temperatura média registrada foi de 18,39 °C. Considerando o mesmo período, foram coletados os dados de temperatura média máxima registrados e podem ser analisados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Temperaturas médias máximas no período de Janeiro de 2016 à Setembro de 2017.



Fonte: INMET.

A maior temperatura média registrada na região próxima à instalação do sistema fotovoltaico é 34,26 °C. Utilizando a Equação (3), corrigimos o valor de tensão do módulo operando em máxima potência (37,9 V em STC) nas temperaturas máxima e mínima obtidas. O resultado é indicado na Tabela 7.

Tabela 7 – Correção da tensão do módulo FV operando em máxima potência.

Grandeza	Coefficiente de Temperatura	Valor corrigido	
$V_{mp_Tmín}$	-0,31%	38,68	V
$V_{mp_Tmáx}$	-0,31%	36,81	V

Fonte: Próprio autor.

Com os valores corrigidos, é possível aplicá-los na expressão (4) e obter a quantidade mínima e máxima de módulos FV que deve existir em cada string para garantir o bom funcionamento do MPPT. Esse intervalo é apresentado na Tabela 12.

Tabela 8 – Quantidade de módulos $V_{mínimo}$ e máximo associados em série para atender o MPPT.

$V_{mín_MPPT}$	500
$V_{máx_MPPT}$	800
$N_{ms_mín}$	14
$N_{ms_máx}$	20

Fonte: Próprio autor.

5.1.3.3 Corrente máxima CC do inversor

A corrente de entrada do inversor não deve ultrapassar sua capacidade admitida. Assim, é necessário calcular a corrente emitida pela fonte fotovoltaica, determinando a quantidade de módulos em paralelo que podem ser ligadas no inversor. Esse número é determinado utilizando a equação (5).

$$N_{ms_paralelo} = \frac{I_{e_max}}{I_{sc}} \quad (5)$$

Sendo,

I_{e_max} a corrente máxima admitida pelo inversor na entrada;

I_{sc} a corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico escolhido.

Há situações que o fabricante do inversor indica esse número na folha de dados do equipamento (PINHO; GALDINO, 2014), como é o caso do modelo utilizado. Observando esse documento, que se encontra no Anexo C, foi definido $N_{ms_paralelo}$ igual a 2.

5.1.3.4 Fator de Dimensionamento do Inversor – FDI

O fator de dimensionamento do inversor é a razão da potência nominal fornecida pelo inversor e a potência de pico do gerador FV, que é a potência fornecida pelo arranjo dos painéis fotovoltaicos, como representada pela Equação (6). Esse fator representa o quanto de potência gerada que foi convertida para adequação do sistema. Segundo Costa (2010), especialistas recomendam uma faixa de 0,75 a 1,2 para o FDI.

$$FDI = \frac{P_{nom}}{P_{FV}} \quad (6)$$

Sendo,

P_{nom} a potência nominal na saída do inversor em W;

P_{FV} a potência do gerador FV em Wp.

Após a avaliação dos quatro critérios para o dimensionamento do inversor, foi obtida a quantidade de inversores necessária. A Tabela 9 agrupa os valores encontrados em cada critério, ou seja, a quantidade de módulos fotovoltaicos em série e o número de arranjos em paralelo permitido, indicando a quantidade total de módulos que pode ser conectado a um inversor do modelo escolhido.

Tabela 9 – Quantidade total de módulos FV conectados a um inversor.

N_{ms}	21
$N_{ms_mín}$	14
$N_{ms_máx}$	20
$N_{ms_paralelo}$	2
Nº MPPT	6
N_{total}	240

Fonte: Próprio autor.

Obtido o número total de módulos FV para um inversor, é possível calcular a quantidade de inversores necessários por galpão, visto que foram determinadas quantidades distintas de

módulos para cada telhado. A Tabela 10 traz esses valores, além do respectivo FDI para assim, verificar se estão de acordo com a recomendação.

Tabela 10 – Quantidade de inversor e FDI em cada galpão.

Galpão	Quantidade de módulos	Quantidade de inversores necessários	FDI
G1	516	3	0,85
G2	144	1	1,02
G3	1224	6	0,72
G4	918	4	0,64
G5	900	4	0,65
G6	1020	5	0,72
G7	1428	6	0,62
G8	1224	6	0,72
G9	1224	6	0,72
Quantidade total de inversores		41	

Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que o fator de dimensionamento de alguns inversores não se encontra na faixa recomendada pelos especialistas, pois estão subdimensionados. Essa questão leva à redução da vida útil do inversor, pois estará funcionando em sobrecarga (COSTA, 2010). Além disso, haverá perda de potência, já que parte da energia convertida pelos painéis FV não serão enviadas para o inversor.

Uma solução para esse problema é reagrupar os módulos de outra forma, alterando o número de módulos em série, por exemplo, a fim de equilibrar as entradas e alcançar o FDI desejado.

5.2 Dimensionamento pelo *Sunny Design*

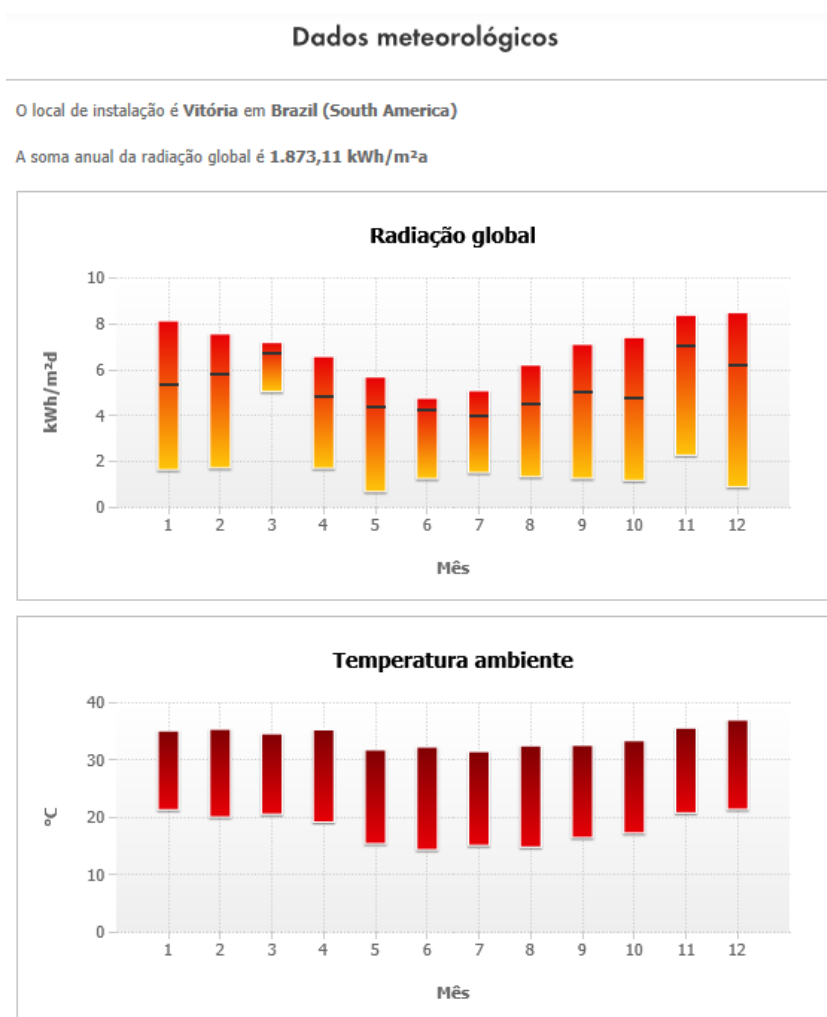
5.2.1 Definir dados do projeto

Iniciou-se a elaboração do projeto com a seleção do tipo de sistema: projeto FV com autoconsumo. Essa opção considera a conexão à rede elétrica.

5.2.2 Dados meteorológicos do local

Deve-se preencher o local de instalação do sistema. Como não foi encontrada a cidade na lista disponibilizada pelo programa, foi necessário inserir os dados climáticos através do carregamento de um documento em .csv, retirados do banco de dados do INMET, como foi utilizado na Seção 5.1.3.1. Assim, o *software* gera um gráfico da irradiação solar diária mensal e a temperatura média, como se observa na Figura 35.

Figura 35 – Dados meteorológicos da cidade próxima à instalação.



Fonte: *Sunny Design*.

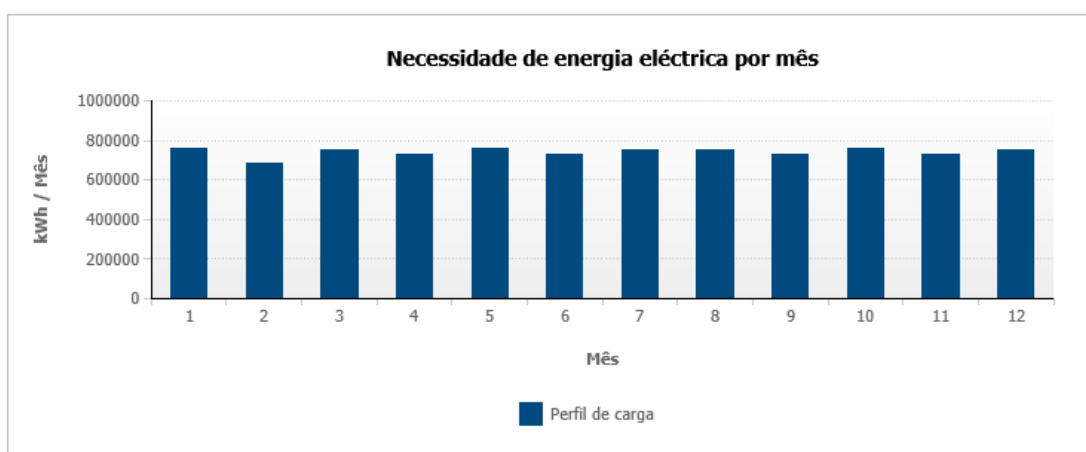
5.2.3 Determinação do perfil de carga no *Sunny Design*

Os tipos de perfil de carga existentes no *software* não possuem semelhança com a unidade em questão. Assim, a alternativa é utilizar as ferramentas e informações disponíveis para traçar o

perfil mais próximo da realidade. Assim, foram utilizados dados de consumo retirados da memória de massa da empresa.

Como há um custo financeiro para obter a memória de massa mensal de uma instalação e certa dificuldade no acesso do documento, foi possível adquirir apenas de um mês (Maio de 2017). Assim, utilizando as informações contidas nela, foi escolhida a semana que resultaria em um consumo anual de energia próximo ao calculado na Seção 4.1. A Figura 36 ilustra o perfil construído com base nos valores inseridos no *software*. O consumo de energia anual calculado é apresentado na Figura 37.

Figura 36 – Perfil de consumo traçado pelo *Sunny Design*.



Fonte: *Sunny Design*.

Figura 37 – Resumo do perfil de carga computado pelo *Sunny Design*.

Resumo	
Necessidade de energia eléctrica do perfil de carga por ano:	8.849.169 kWh
Necessidade de energia eléctrica dos equipamentos consumidores especiais por ano:	---
Necessidade de energia eléctrica total por ano:	8.849.169 kWh

Fonte: *Sunny Design*.

5.2.4 Configuração do gerador FV

Como os módulos FV são dimensionados para nove galpões distintos, foram criados nove subprojetos, sendo possível separar e caracterizar a configuração de cada um. Seguindo as informações apresentadas na Tabela 6, foram inseridos a quantidade de módulos FV, o mesmo modelo utilizado no dimensionamento analítico e indicação da inclinação e sentido do módulo. A Figura 38 ilustra a configuração realizada para o galpão 5.

Figura 38 – Configuração dos geradores FV do galpão 5.

▼ Geradores fotovoltaicos						
Nome	Fabricante / módulo fotovoltaico / electrónica de módulos			Número de módulos fotovoltaicos/potência de pico	Alinhamento / tipo de montagem	
1 Gerador fotovoltaico 1	Canadian Solar Inc.	CS6U-340M Maxpower (01/2017)	 	900 módulos fotovoltaicos 306,00 kWp	 180 °  20 °	

Fonte: *Sunny Design*.

5.2.5 Configuração do inversor

O modelo de inversor é selecionado em cada subprojeto. O próximo passo é escolher o modo de dimensionamento. Para este trabalho, optou-se pela sugestão de dimensionamento, para verificar as opções que o *software* oferece para o atual sistema e assim decidir qual a melhor configuração.

Na Figura 39, encontra-se a configuração sugerida pelo *software*. São apresentados o número de módulos em série conectados em cada entrada do MPPT, o número de strings, a quantidade e eficiência do inversor, o FDI, dentre outros dados. É possível observar as características elétricas em cada entrada MPPT, facilitando a análise e comportamento desses parâmetros.

Figura 39 - Dimensionamento do inversor para o galpão 1 realizado pelo *Sunny Design*.

<

Fonte: *Sunny Design*.

O dimensionamento de inversor para outros galpões foram realizados utilizando o mesmo procedimento.

A quantidade de módulos conectados em cada entrada do rastreador do ponto de máxima potência de cada inversor é indicada na Tabela 11. Observa-se que em alguns galpões, há

inversores com configurações diferentes, por isso são representados pelas letras “a”, “b” e “c”. As letras “A”, “B”, “C”, “D”, “E” e “F” representam as entradas MPPT do inversor, “N” é o número de inversores utilizando a configuração correspondente e os números 1 e 2 representam as duas entradas de string permitidas em cada MPPT.

Tabela 11 - Quantidade de módulos FV em cada entrada do inversor.

G1	A	B	C	D	E	F	N	G6-a	A	B	C	D	E	F	N
1	18	18	19	19	0	0	4	1	20	20	20	20	9	0	5
2	18	18	0	19	0	0		2	20	20	0	20	0	0	
G2	A	B	C	D	E	F	N	G6-b	A	B	C	D	E	F	N
1	21	21	20	20	0	0	1	1	20	20	19	19	0	0	1
2	21	21	0	20	0	0		2	20	20	0	19	0	0	
G3-a	A	B	C	D	E	F	N	G6-c	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	20	20	18	0	6	1	20	20	20	20	18	0	1
2	20	20	0	20	0	0		2	20	20	0	0	0	0	
G3-b	A	B	C	D	E	F	N	G7-a	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	19	19	0	0	1	1	20	20	20	20	19	0	8
2	20	20	0	19	0	0		2	20	20	0	20	0	0	
G3-c	A	B	C	D	E	F	N	G7-b	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	20	20	19	0	1	1	20	20	19	19	0	0	1
2	20	20	0	19	0	0		2	20	20	19	19	0	0	
G4-a	A	B	C	D	E	F	N	G8-a	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	20	20	0	0	4	1	20	20	20	20	18	0	6
2	20	20	20	20	0	0		2	20	20	0	20	0	0	
G4-b	A	B	C	D	E	F	N	G8-b	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	19	19	0	0	1	1	20	20	19	19	0	0	1
2	20	20	0	19	0	0		2	20	20	0	19	0	0	
G4-c	A	B	C	D	E	F	N	G8-c	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	20	20	21	0	1	1	20	20	20	20	19	0	1
2	20	20	0	0	0	0		2	20	20	0	0	0	0	
G5-a	A	B	C	D	E	F	N	G9-a	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	19	19	0	0	4	1	20	20	20	20	18	0	6
2	20	20	19	19	0	0		2	20	20	0	20	0	0	
G5-b	A	B	C	D	E	F	N	G9-b	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	19	19	0	0	1	1	20	20	19	19	0	0	1
2	20	20	0	19	0	0		2	20	20	0	19	0	0	
G5-c	A	B	C	D	E	F	N	G9-c	A	B	C	D	E	F	N
1	20	20	20	20	19	0	1	1	20	20	20	20	19	0	1
2	20	20	0	0	0	0		2	20	20	0	0	0	0	

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 12 apresenta os valores de rendimento e FDI fornecidos pelo *software* para cada caso.

Tabela 12 - Quantidade de inversores em cada galpão, rendimento e FDI.

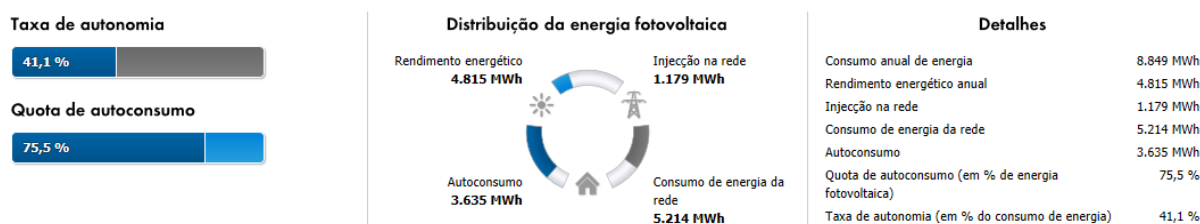
Galpão	Quantidade de inversores	FDI	Galpão	Quantidade de inversores	FDI
G1	4	1,16	G6	5	1,01
G2	1	1,04		1	1,09
G3	6	0,95		1	1,09
	1	1,09	G7	8	0,94
	1	1,08		1	0,96
G4	4	0,94	G8	6	0,95
	1	1,09		1	1,09
	1	1,06		1	1,08
G5	4	0,96	G9	6	0,95
	1	1,09		1	1,09
	1	1,08		1	1,08
TOTAL DE INVERSORES			57		

Fonte: Próprio autor.

5.2.6 Vista geral do resultado

Após o dimensionamento do sistema FV, o programa fornece a quantidade de energia produzida, consumida pela geração FV e pela rede e o rendimento energético anual, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Vista geral do resultado fornecido pelo *Sunny Design*.



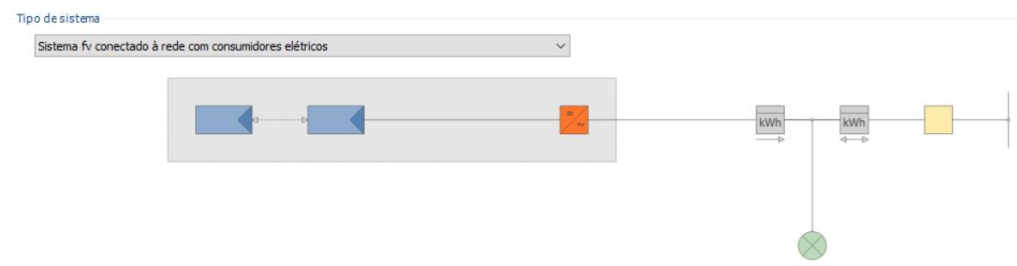
Fonte: *Sunny Design*.

5.3 Dimensionamento pelo PV*SOL

5.3.1 Configurações do projeto

Primeiramente, o tipo de sistema deve ser definido. Para este trabalho, a opção será um sistema FV conectado à rede com consumidores elétricos. Assim que o item é definido, o esquema de ligação é ilustrado pelo programa e pode ser visto a Figura 40.

Figura 41 – Exemplo de esquema de ligação do sistema FV conectado à rede com consumidores elétricos.



Fonte: PV*SOL.

Em seguida, deve-se definir a localização da instalação e os dados da rede de tensão alternada. Os campos foram preenchidos de acordo com as informações apresentadas na caracterização da planta, como se observa na Figura 41.

Figura 42 - Definição do local e rede no PV*SOL.

A imagem mostra a interface do software PV*SOL para a definição de local e rede. A interface é dividida em duas seções principais: "Dados climáticos" e "Rede c.a.". Na seção "Dados climáticos", há campos para "País" (Brasil) e "Local" (Jacaraípe). Abaixo, há uma tabela com os seguintes dados:

Dados climáticos	
Latitude	-20° 8' 22" (-20,14°)
Longitude	-40° 11' 16" (-40,19°)
Fuso horário	UTC-3
Período	1991 - 2010
Resolução	Por hora

À direita da tabela, há os seguintes dados:

Dados de rede e clima	
Soma anual da irradiação global	1833 kWh/m²
Média anual da temperatura	25 °C

Na seção "Rede c.a.", há um botão "Inserir" e os seguintes dados:

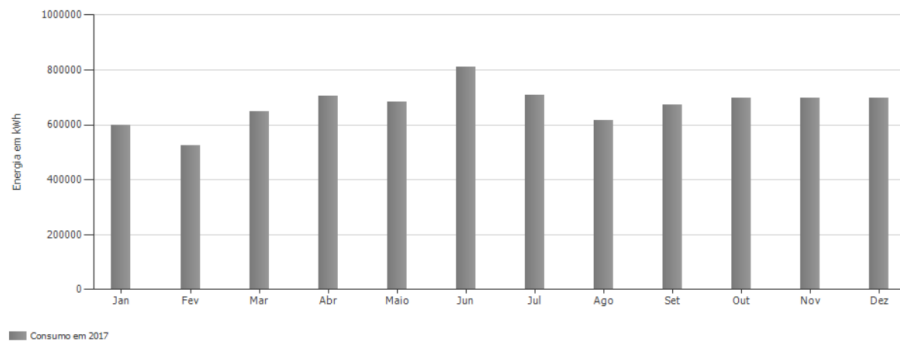
Rede c.a.	
Tensão (N+1)	220 V
Quantidade de fases	3-fase(s)
cos φ	1
Limitação da potência de injeção	Não

Fonte: PV*SOL.

5.3.2 Determinação do perfil de carga

Foram utilizados os valores de consumo de energia de 2017, desde Janeiro a Outubro. Para o mês de Novembro e Dezembro, houve a replicação do último valor real obtido, ou seja, de Outubro. O perfil de carga resultante e empregado pelo projeto é ilustrado pela Figura 43.

Figura 43 - Perfil de carga da unidade consumidora traçado pelo PVSOL Premium.



Fonte: PV*SOL.

5.3.3 Configuração do gerador FV

Nesta etapa, foi adotado o modelo de módulo FV para todos os testes. Como o fator limitante deste projeto é o espaço disponível para instalação dos equipamentos, foi utilizada a mesma quantidade de módulos obtida no dimensionamento analítico, informação encontrada na Tabela 5.

Como são nove galpões, e em cada um há um número distinto de módulos, o PVSOL permitiu a adição de nove subprojetos, sendo possível a configuração individual de cada um, como ilustrado na Figura 44.

Figura 44 - Configuração do gerador FV no PVSOL.

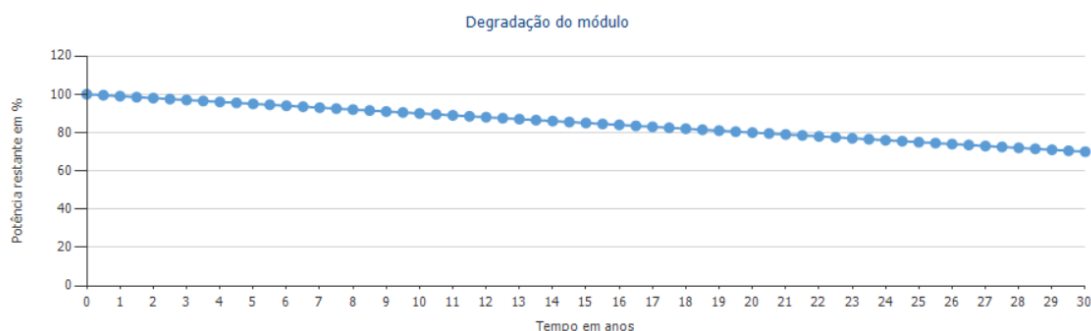
Configuração do gerador FV no PVSOL:

- Empresa:** Canadian Solar Inc.
- Modelo:** CS6U-340M
- ☐ Seleção apenas dos favoritos
- ☐ Photo Plan - Previsão fotográfica da cobertura do telhado
- ☐ Ocupação gráfica
- Número de módulos:** 516 (175,44 kWp) [Calcular em relação ao consumo](#)
- Situação de montagem:** Paralelo ao telhado - boa ventilação
- Rastreamento:** Nenhum
- Inclinação:** 19°
- Orientação:** 0°
- Compasso:** Azimute 0°

Fonte: PV*SOL.

Em cada situação, foi considerada uma degradação linear do módulo FV, mostrado na Figura 45, devido às condições de campo que são submetidas, a uma taxa de 1,0% ao ano (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 45 - Degradação do módulo FV considerado no sistema.



Fonte: PV*SOL.

Como não há construções e obstáculos naturais ao redor da empresa, foi desconsiderado o fator de sombreamento no projeto, ou seja, não haverá redução da irradiação solar por causa de sombras causadas por estruturas.

5.3.4 Configuração do inversor

O dimensionamento do inversor foi realizado com base na quantidade de módulos FV que serão instalados em cada galpão. O resultado gerado pelo programa foi sua melhor configuração em relação a menor quantidade de inversores, o equilíbrio das entradas MPPT, o FDI, maior taxa de qualidade do dimensionamento (descrito na Seção 3.2.4) e, respeitando, acima de tudo, as especificações elétricas e utilizando o modelo de interesse. A Tabela 13 mostra em detalhes a quantidade de módulos ligados em cada entrada do inversor, seguindo o mesmo padrão da Tabela 11, realizado para o programa *Sunny Design*.

Tabela 13 - Quantidade de módulos FV em cada entrada do inversor.

G1	A	B	C	D	E	F	N	G6	A	B	C	D	E	F	N
1	19	19	19	17	19	5	3	1	19	19	19	16	19	5	6
2	19	19	19	17	0	0		2	19	19	19	16	0	0	
G2	A	B	C	D	E	F	N	G7-a	A	B	C	D	E	F	N
1	19	17	12	12	19	5	1	1	19	19	13	13	13	5	6
2	19	17	12	12	0	0		2	19	19	13	13	13	0	
G3	A	B	C	D	E	F	N	G7-b	A	B	C	D	E	F	N
1	19	16	13	13	13	5	8	1	19	19	16	13	19	5	3

2	19	16	13	13	13	0		2	19	19	16	13	0	0	
G4	A	B	C	D	E	F	N	G8	A	B	C	D	E	F	N
1	19	16	13	13	13	5	6	1	19	16	13	13	13	5	8
2	19	16	13	13	13	0		2	19	16	13	13	13	0	
G5	A	B	C	D	E	F	N	G9	A	B	C	D	E	F	N
1	19	18	13	13	19	5	6	1	19	16	13	13	13	5	8
2	19	18	13	13	0	0		2	19	16	13	13	13	0	

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 - Quantidade de inversores por galpão e FDI.

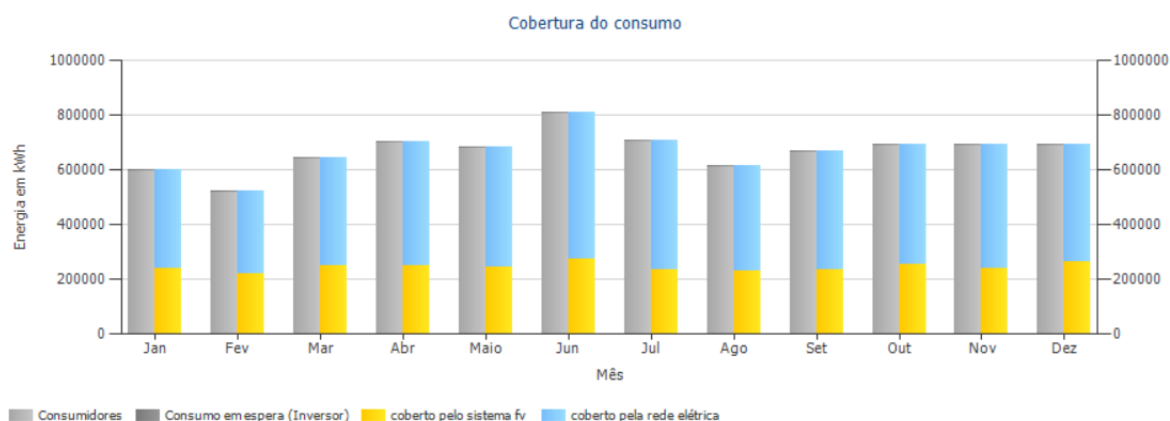
Galpão	Quantidade de inversores	FDI	Galpão	Quantidade de inversores	FDI
G1	3	1,17	G6	6	1,16
G2	1	0,98	G7	6	1,08
G3	8	1,04		3	1,07
G4	6	1,04	G8	8	1,04
G5	6	1,02	G9	8	1,04
TOTAL DE INVERSORES			55		

Fonte: Próprio autor.

5.3.5 Produção e consumo de energia

Ao final do dimensionamento, o programa apresenta a quantidade de energia consumida pelo sistema fotovoltaico e pela rede elétrica. A Figura 46 foi retirada do *software* e apresenta o consumo mensal de energia, e as parcelas cobertas pelo sistema FV e pela rede.

Figura 46 - Cobertura do consumo pelas fontes existentes no sistema.



Fonte: PV*SOL.

5.4 Dimensionamento pelo PVsyst

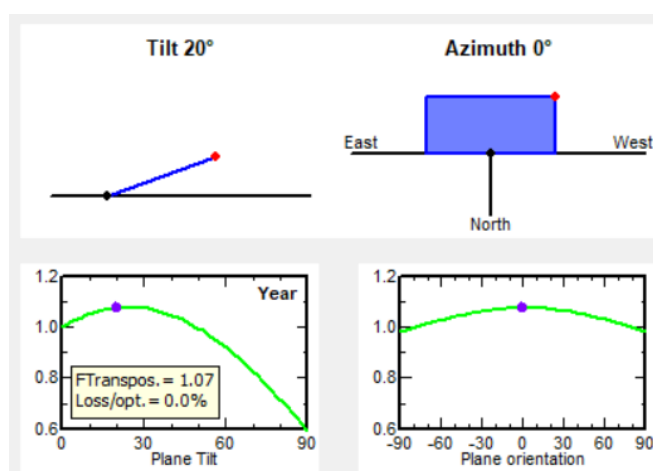
5.4.1 Configuração do projeto

O primeiro passo foi escolher o tipo de sistema a ser dimensionado, que neste caso é a conexão à rede elétrica. Assim, inicia-se o processo de caracterização do projeto, começando com a localização. Como a cidade de interesse não foi encontrada na lista fornecida pelo programa, foi preciso criar um novo local, para assim, coletar os dados meteorológicos do local. Como citado na Seção 3.3.1, tais dados podem ser encontrados em fontes específicas de pesquisa, e assim, adotado conforme o banco de dados da NASA.

5.4.2 Orientação do módulo FV

A inclinação do módulo FV foi a mesma considerada para outras análises, de 20° apontados para o Norte. Nesta etapa, é analisada a porcentagem de perda em relação à posição do módulo, dependendo do período considerado. Como o sistema deve ser dimensionado para funcionar não apenas em um período, mas o ano inteiro, foi realizada uma análise anual. O programa apresenta a curva de otimização da inclinação do módulo e a sua orientação, indicando a perda anual dessa configuração através do ponto de cor roxa, como se observa na Figura 47.

Figura 47 - Otimização da posição do módulo FV.



Fonte: PVsyst.

Pelo fator de transposição, observa-se que a inclinação traz vantagem em relação à posição horizontal, ou seja, há maior captação de irradiação solar.

5.4.3 Determinação do gerador FV

Para o dimensionamento do gerador FV neste programa, foram inseridos os valores de potência planejada em cada aba sub-array, representando os nove galpões. Como citado na apresentação do *software*, é permitido criar até oito abas. Sabe-se que o galpão 8 e 9 possuem as mesmas dimensões, portanto, idêntica configuração, tanto para os módulos, quanto para inversores. Assim, são preenchidas as oito abas, cada uma com a quantidade pré-determinada (seção 5.2.1) de potência a ser gerada.

Em seguida, seleciona-se o modelo de módulo de interesse. Como é um modelo lançado recentemente no mercado, não foi encontrado na lista das opções. Assim, foi necessário cadastrá-lo no banco de dados do programa, retirando seus dados técnicos da folha de dados do fabricante.

A Figura 48 ilustra o procedimento para definir o gerador FV em cada galpão.

Figura 48 - Configuração do gerador FV.

The screenshot displays the PVsyst software interface for configuring a PV generator. At the top, there are tabs for Sub-array #1 through Sub-array #8. The 'Sub-array #1' tab is active. Below the tabs, the 'Sub-array name and Orientation' section shows 'Name: Sub-array #1', 'Order: 1', 'Tilt: 20°', and 'Azimuth: 0°'. The 'Presizing Help' section shows 'Enter planned power: 175.4 kWp' and 'or available area(modules): 1003 m²'. The 'Select the PV module' section shows 'Available Now' dropdown, 'Canadian Solar Inc.' selected, '340 Wp 32V Si-mono CS6U-340M' module details, 'Since 2017' date, and 'Manufacturer 2017' dropdown. The 'Approx. needed modules' is 516. Sizing voltages are Vmpp (60°C) 32.3 V and Voc (-10°C) 51.6 V. There is a 'Use Optimizer' checkbox.

Fonte: PVsyst.

5.4.4 Configuração do inversor

O dimensionamento do inversor, por sua vez, é executado pelo programa, respeitando os limites elétricos dos equipamentos. A configuração é apresentada de forma automática, ou seja, assim que o modelo a ser utilizado é definido. O resultado apresenta o número de inversores ou o número de MPPT necessários, a quantidade de módulos associados em série, o número de strings, o FDI e a porcentagem de perda de potência por sobrecarga. Note que o programa não fornece detalhadamente a quantidade de strings por entrada, nem mesmo quais entradas MPPT são utilizadas na configuração dada. Essa situação pode ser observada na Figura 49, sendo o resultado encontrado para o galpão 1.

Figura 49 - Configuração do inversor fornecida pelo PVsyst.

The screenshot displays the PVsyst software interface for inverter configuration and array design. The top section, 'Select the inverter', shows the selection of an SMA Sunny Tripower CORE1 inverter with a power of 50 kW, operating at 500-800 V and 60 Hz. The number of inverters is set to 3, and the global inverter power is 150 kWac. The bottom section, 'Design the array', shows the number of modules as 520 and the area as 1011 m². The array is configured with 20 modules in series and 26 strings. The operating conditions include a plane irradiance of 1000 W/m², Vmpp (60°C) of 646 V, Vmpp (20°C) of 775 V, and Voc (18°C) of 946 V. The maximum operating power at 1000 W/m² and 50°C is 159 kW. The array nominal power (STC) is 177 kWp.

Fonte: PVsyst.

O resultado gerado também não dimensiona o inversor para o número exato de módulos inseridos, configurando-o para conectar um valor maior. O dimensionamento para outros galpões foram satisfatórios, visto que os inversores atenderam o número correto de módulos FV. O resultado de todos os casos pode ser visto na Tabela 15.

Tabela 15 - Quantidade de inversores para cada galpão.

Galpão	Quantidade de inversores	Módulos em uma string	Quantidade de strings
G1	3	20	26
G2	1	16	9
G3	7	18	68
G4	5	18	51
G5	5	18	50
G6	6	17	60
G7	8	17	84
G8	7	18	68
G9	7	18	68
TOTAL DE INVERSORES		49	

Fonte: PVsyst

Assim, o autor do projeto deve organizar as strings de módulos FV e calcular o FDI do inversor em questão, para verificar se o mesmo encontra-se compatível com o sistema.

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após o desenvolvimento do sistema FV através de quatro métodos distintos, foi possível observar, além da divergência dos resultados, vários aspectos em relação aos fatores que foram levados em consideração em cada processo e a utilidade dos programas. A Tabela 16 resume o resultado obtido em cada método.

Tabela 16 - Quantidade de inversores definidos no projeto por cada método.

Método Galpão	Analítico	<i>Sunny Design</i>	PVSOL	PVsyst
G1	3	4	3	3
G2	1	1	1	1
G3	6	8	8	7
G4	4	6	6	5
G5	4	6	6	5
G6	5	7	6	6
G7	6	9	9	8
G8	6	8	8	7
G9	6	8	8	7
TOTAL	41	57	55	49

Fonte: Próprio autor.

No método analítico, foi encontrado o problema do FDI, pois alguns inversores estavam subdimensionados, apresentando um fator de dimensionamento muito abaixo da faixa recomendada. Para tratar essa questão, é necessário alterar a quantidade de módulos em série em cada entrada do rastreador de máxima potência. Esse processo manual demandaria muito trabalho e tempo do projetista caso o sistema envolva uma grande quantidade de módulos, além de estar sujeito a erros. Outro problema é a questão da escolha do inversor. Neste trabalho foi realizada a análise de um modelo. Entretanto, é preciso verificar se outros modelos atenderão melhor o sistema, precisando assim, executar o processo do método analítico para todos os modelos selecionados e efetuar as devidas comparações.

O dimensionamento realizado no *software Sunny Design* e *PV*SOL* apresentou resultados semelhantes, pois possuem procedimento e itens similares. O motivo da diferença na quantidade de inversores está na configuração dos módulos conectados a eles. O *software Sunny Design* dimensionou os inversores em todos os galpões, não utilizando todas as entradas MPPT

disponíveis. Pela Tabela 11, apresentada na Seção 5.2.5, é possível observar que a sexta entrada MPPT do inversor não foi utilizada em nenhum dos casos. Já o *software* PV*SOL equilibra todas as entradas fornecidas para fazer o uso completo do equipamento, necessitando assim, de menos quantidade do mesmo. Ambos os programas forneceram um FDI de acordo com o recomendado, garantindo seu bom funcionamento.

O *software Sunny Design* é uma boa ferramenta para o dimensionamento de sistemas FV, porém deve-se destacar que o mesmo não realiza análises de sombreamento e não leva em conta a degradação sofridos pelos módulos FV. Apesar disso, é possível inserir dados reais de consumo e demanda de um ano, traçando um perfil de carga mais fiel. O programa também disponibiliza outras opções de inversores a serem utilizados de acordo com o número de módulos do sistema e essas opções podem ser disponibilizadas lado a lado com seus respectivos parâmetros, facilitando a comparação e a escolha da melhor configuração.

O programa PV*SOL é ideal no dimensionamento de sistema FV para atender consumidores residenciais, pois há opções de perfil de carga já traçados no programa, devendo apenas especificar a quantidade de pessoas que vivem nela, classificando-as por idade e se passa mais tempo fora da instalação ou não, ou seja, se há mais consumo de energia durante o dia. Além disso, é possível adicionar cargas típicas de residência, como lâmpadas, geladeira, aspirador de pó, dentre outros, detalhando, assim, o perfil de consumo.

O *software* PVsyst, por sua vez, dimensionou o sistema com 49 inversores, porém não apresentou detalhes da configuração das conexões com o módulo FV. Assim, deve-se montar manualmente as configurações de cada entrada, de acordo com o número de strings fornecidos pelo programa, respeitando o número de módulos associados em série, já que atendem as características elétricas do inversor da forma dada. Outro ponto observado é que o programa não traçou o perfil de carga do cliente, considerando assim, que o consumo será uniforme durante o ano, o que não é comum na realidade de uma indústria, por exemplo. Apesar disso, o *software* PVsyst elabora o projeto levando em consideração todas as perdas possíveis de um módulo FV, como a sua degradação, a diferença construtiva das células e a perda sofrida pelo módulo nas primeiras horas de funcionamento.

Assim, foi possível perceber que os três *softwares* possuem ferramentas e considerações similares. No quadro 1, se observa, de forma sucinta, as principais características dos programas.

Quadro 1 - Principais características dos programas computacionais.

Software Ferramentas	<i>Sunny Design</i>	PV*SOL	PVsyst
Análise de dados meteorológicos	Sim. Aceita importação de dados.	Sim. Aceita importação de dados.	Sim. Aceita importação de dados.
Construção de perfil de carga	Sim	Sim	Não
Diversidade de modelos de módulos FV	Sim	Sim	Sim
Verificação da posição do módulo FV	Sim	Sim	Sim
Estudo do sombreamento	Não	Sim	Sim
Consideração da degradação ao longo do tempo	Não	Sim	Sim
Diversidade de modelos de inversor	Não	Sim	Sim
Fornecimento de sugestão de configuração do inversor	Sim	Sim	Não
Interface amigável	Sim	Sim	Não
Aquisição	Gratuita	Versão de teste (30 dias): gratuita.	Versão de teste (30 dias): gratuita.

Fonte: Próprio autor.

7 CONCLUSÃO

Dois projetos elétricos podem se diferenciar mesmo executados para um mesmo destino, pois as decisões e organizações não são as mesmas se elaborados por responsáveis distintos. Os pontos em comum existentes, sem dúvidas, são as normas e leis que devem ser seguidas e respeitadas. O mesmo ocorre nos projetos de sistemas fotovoltaicos quando realizados por métodos variados.

Neste trabalho, foi possível observar que há diferentes técnicas para dimensionar os equipamentos compostos pelo sistema FV. É essencial conhecer o local onde o sistema é projetado, com a finalidade de obter informações referentes à localização geográfica e dados climáticos, para analisar o comportamento da posição do Sol ao longo do dia, e assim, verificar o potencial solar da área. Esses fatores contribuem para a verificação da viabilidade da instalação e a decisão de como e onde os módulos FV estarão dispostos. As características meteorológicas estão em constante mudança ao longo do ano e, portanto, o sistema deve ser bem dimensionado para funcionar de forma harmoniosa e conveniente. Por exemplo, caso o sistema seja projetado para funcionar apenas no verão, onde, a temperatura ambiente é elevada, o sistema pode ter problemas no período do inverno, pois em baixas temperaturas, a tensão nas células FV se elevam. Além disso, o projeto deve considerar o perfil de consumo da instalação que o sistema FV suprirá, para assim, construir o projeto da melhor maneira, atendendo o consumidor durante o ano todo.

É necessário levantar as perdas que o sistema pode ter, e se for preciso, reprojetar o sistema. Quanto mais informações são agregadas e analisadas no projeto, mais eficiente o sistema funciona, visto que os componentes existentes nele serão bem dimensionados e compatíveis com as condições expostas. Caso o projeto não seja bem elaborado, além de não suprir a demanda do consumidor, poderá haver prejuízos e má utilização dos materiais.

O dimensionamento pode ser realizado através de diversos métodos, tanto analítico, como utilizando ferramentas computacionais. O procedimento analítico é essencial para entender o comportamento de cada parâmetro e componente envolvido no sistema. O *software* é indicado para usuários que já possuem um conhecimento aprofundado de sistemas FV, pois durante a

execução do projeto, muitas vezes é necessário decidir a melhor configuração dentre as opções geradas pelo programa e interpretar o comportamento das grandezas elétricas.

Assim, percebe-se que o uso de ferramentas computacionais é vantajoso para projetar um sistema fotovoltaico, visto que podem ser gerados diversas configurações, devendo o responsável decidir a opção que melhor atenderá a instalação.

Além de verificar a execução de um dimensionamento, é interessante para o projeto analisar a sua viabilidade econômica, já que é um fator decisivo para a sua implementação. Como o foco deste trabalho é comparar os resultados de dimensionamento do sistema FV e apontar as considerações efetuadas pelos programas, não foi realizada a análise econômica, mas que poderia ser o passo seguinte, após a escolha da melhor configuração.

Outra complementação seria realizar um estudo da capacidade limite de peso do galpão da empresa, já que foi considerado apenas o espaço livre para definição da quantidade de módulos. Caso o estudo apresente condições desfavoráveis ao sistema construído neste trabalho, poderiam ser construídos estruturas e suportes para a montagem dos painéis e ainda verificar o comportamento de um sistema FV utilizando a outra face do telhado, ou seja, realizar um estudo de viabilidade de instalação de módulos nas duas faces do telhado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO – CRESESB. **Potencial Solar – SunData**. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 1 de Outubro de 2017.

COSTA, Higor José Serafim da. **Avaliação do fator de dimensionamento do inversor em sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2010. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, UFCE, Fortaleza, 2010. Cap. 2.

COSTA, Rômulo Fernandes da. **Chaveamento de cargas intermitentes usando sensor de corrente**. 2015. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro. 2007.

FERNANDES, Romenique Oliveira; SOUZA, Sabrina de Angeli; MOREIRA, Thiago Molino. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial**. Vitória: Fontes Alternativas de Energia Elétrica, 2015. 32 slides, color. PROINFA SUSTENTABILIDADE

International Energy Agency (IEA). **Snapshot of global photovoltaic markets**. Mary Brunisholz, IEA PVPS, 2017.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 1 de Outubro de 2017.

MARINOSKI, Deivis Luis; SALAMONI, Isabel Tourinho; RÜTHER, Ricardo. **Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso de edifício sede do CREA-SC**. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10., 2004, São Paulo: ANTAC, 2004.

MACKAY, Michael E. **Solar Energy: An Introduction**. Oxford: Oxford University Press, 2015.

MARINOSKI, Deivis Luis; SALAMONI, Isabel Tourinho; RÜTHER, Ricardo Ruther. **Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso de edifício sede do CREA-SC**. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10., 2004, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2004.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. **Energia solar no brasil: situação e perspectivas**. Brasília: Consultoria Legislativa, 2017. 46 p.

NETO, Alexandre Francisco. **Análise do efeito das variáveis radiação solar e temperatura ambiente no dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid**. 2017. 131 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cresesb, 2014. 530 p.

SUZUKI, Eimi Veridiane; REZENDE, Fernanda Dutra. **Estudo da utilização da geração fotovoltaica para auxiliar a suprir a demanda crescente de energia elétrica no Brasil**. 2013. 63 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Eficiência Energética, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ANEXO A





MAXPOWER

CS6U-330 | 335 | 340 | 345M

Canadian Solar's modules use the latest innovative cell technology, increasing module power output and system reliability, ensured by 15 years of experience in module manufacturing, well-engineered module design, stringent BOM quality testing, an automated manufacturing process and 100% EL testing.

KEY FEATURES

- 
Excellent module efficiency of up to: 17.74 %
- 
Outstanding low irradiance performance of up to: 96.5 %
- 
High PTC rating of up to: 92.17 %
- 
IP68 junction box for long-term weather endurance
- 
Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa

25
years

linear power output warranty

10
years

product warranty on materials and workmanship

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2008 / Quality management system
ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / CQC / MCS / INMETRO / CEC AU
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / FSEC (US Florida)
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1
IEC 60068-2-68: SGS
Take-e-way







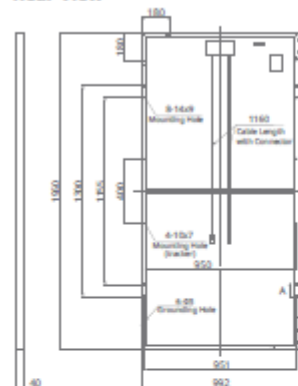
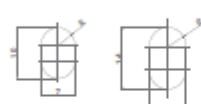
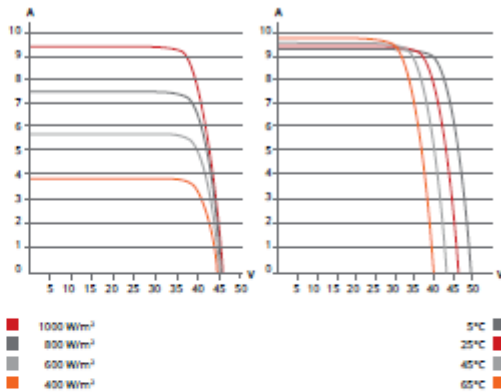




* Please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific product certificates applicable in your market.

CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 21 GW deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

CANADIAN SOLAR INC.
545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)**Rear View****Frame Cross Section A-A****Mounting Hole****CS6U-335M / I-V CURVES****ELECTRICAL DATA | STC***

CS6U	330M	335M	340M	345M
Nominal Max. Power (P _{max})	330 W	335 W	340 W	345 W
Opt. Operating Voltage (V _{mp})	37.5 V	37.8 V	37.9 V	38.1 V
Opt. Operating Current (I _{mp})	8.80 A	8.87 A	8.97 A	9.06 A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	45.9 V	46.1 V	46.2 V	46.4 V
Short Circuit Current (I _{sc})	9.31 A	9.41 A	9.48 A	9.56 A
Module Efficiency	16.97%	17.23%	17.49%	17.74%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	72 (6×12)
Dimensions	1960×992×40 mm (77.2×39.1×1.57 in)
Weight	22.4 kg (49.4 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL), 1160 mm (45.7 in)
Connector	T4 series
Per Pallet	26 pieces, 635 kg (1400 lbs)
Per Container (40' HQ)	624 pieces

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6U	330M	335M	340M	345M
Nominal Max. Power (P _{max})	242 W	246 W	250 W	253 W
Opt. Operating Voltage (V _{mp})	34.5 V	34.8 V	34.9 V	35.1 V
Opt. Operating Current (I _{mp})	7.03 A	7.08 A	7.16 A	7.23 A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	42.7 V	42.9 V	43.0 V	43.2 V
Short Circuit Current (I _{sc})	7.52 A	7.60 A	7.66 A	7.72 A

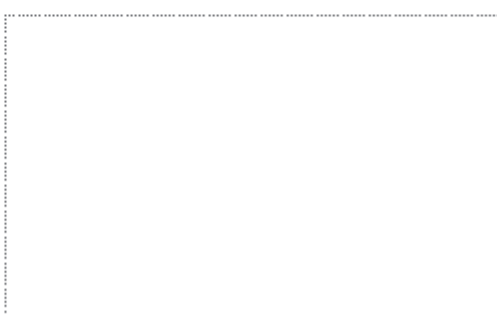
* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (P _{max})	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (V _{oc})	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (I _{sc})	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	43 ± 2 °C

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Outstanding performance at low irradiance, with an average relative efficiency of 96.5 % for irradiances between 200 W/m² and 1000 W/m² (AM 1.5, 25°C).

PARTNER SECTION

The aforesaid datasheet only provides the general information on Canadian Solar products and, due to the on-going innovation and improvement, please always contact your local Canadian Solar sales representative for the updated information on specifications, key features and certification requirements of Canadian Solar products in your region.

Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

ANEXO B

```

%%%%%%%%%% Determinar melhor arranjo de modulos
fotovoltaicos%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Lilian Naoko Fujiwara %%%%%%%%%%%
clc, clear all, close all

%%Dimensão do módulo em mm:
x_mod = 1960;
y_mod = 992;

%%Dimensão de um Painei: considerar mxn modulos por painei
%m quantidade modulos na horizontal
%n quantidade modulos na vertical
m = 3;
n = 2;
x_painel = x_mod*m;
y_painel = y_mod*n;

%%Dimensão do galpão 1 em mm: x_g1 e y_g1
x_g1 = 110000;
y_g1 = 25385.66;

%%%%%%%%%%Quantidade de paineis no galpao
1%%%%%%%%%%
    %%Painel "deitado"

%%fator de correção para dimensão do painei
fc_pain_x = 250; %espacamento de 500mm entre os conjuntos
fc_pain_y = 50; %espacamento de 100mm entre os conjuntos

%%Dimensão do painei deitado corrigido pelo fator de
correção
x_pain_corr_d = x_painel + 2*fc_pain_x;
y_pain_corr_d = y_painel + 2*fc_pain_y;

nx_deitado = floor(x_g1/x_pain_corr_d);
ny_deitado = floor(y_g1/y_pain_corr_d);
quant_deitado_g1 = m*n*nx_deitado*ny_deitado;
sprintf('Quantidade de módulos se o painei estiver
deitado: %d',quant_deitado_g1)

%%%%%%%%%%Painel "em pé"%%%%%%%%%%

%%Dimensão do painei em pé corrigido pelo fator de
correção

```

```

x_pain_corr_pe = y_painel + 2*fc_pain_x;
y_pain_corr_pe = x_painel + 2*fc_pain_y;
nx_pe = floor(x_g1/x_pain_corr_pe);
ny_pe = floor(y_g1/y_pain_corr_pe);
quant_pe_g1 = m*n*nx_pe*ny_pe;
sprintf('Quantidade de módulos se o painel estiver em pé:
%d',quant_pe_g1)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Considerar fileiras horizontais
%%margem do telhado
x_margem = 500;

%%espaço vertical entre as fileiras fc_pain_x = 250 mm

%%quantidade de módulos por fileira
m_fileira = floor((x_g1-2*x_margem)/x_mod);
%%quantidade de fileiras na vertical
n_fileira = floor((y_g1)/(y_mod+2*fc_pain_x));
%%quantidade total de módulos
quant_fileira_g1 = m_fileira*n_fileira;
sprintf('Quantidade de módulos se o painel estiver em
fileiras: %d',quant_fileira_g1)

```

ANEXO C

SUNNY TRIPOWER CORE1
STP 50-40

STP 50-40

World's first free standing inverter

Up to 60 % faster installation for commercial PV systems

Cost-Effective - Floor-mounted device easy to install - No DC fuses required - Integrated DC disconnect	Highly Integrated - Integrated Wi-Fi access with any mobile device 12 direct string inputs reduce labor and material costs - AC/DC overvoltage protection (optional)	Fastest Installation - Fast grid connection due to easy inverter configuration and commissioning - Completely accessible connection areas	Maximum Yields - Up to 150% DC:AC ratio - Six independent MPPT trackers guarantee optimal energy production for every use, even in shading
--	---	---	--

SUNNY TRIPOWER CORE1

Stands on its own

The Sunny Tripower CORE1 is the world's first free-standing string inverter for decentralized rooftop and ground-based PV systems as well as covered parking spaces. The CORE1 is the third generation in the successful Sunny Tripower product family and is revolutionizing the world of commercial inverters with its innovative design. SMA engineers developed an inverter that combines a unique design with an innovative installation method to significantly reduce installation time and provide all target groups with a maximum return on investment.

From delivery and installation to operation, the Sunny Tripower CORE1 generates widespread savings in logistics, labor, materials and services. Commercial PV installations are now quicker and easier to complete than ever before.

