

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM  
PROTÓTIPO DE ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA**

**Autora: Bárbara de Luca De Franciscis Gouveia  
Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira**

**Brasília, dezembro de 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM  
PROTÓTIPO DE ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA**

**BÁRBARA DE LUCA DE FRANCISCIS GOUVEIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA ELETRICISTA.

APROVADA POR:

---

**Prof. Dr.: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, UnB / ENE**  
Orientador

---

**Prof. Dr.: Rafael Amaral Shayani, UnB / ENE**  
Professor Convidado

---

**Prof. Me.: Ronaldo Sérgio Chacon Camargos, UnB / ENE**  
Professor Convidado

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

DE LUCA DE FRANCISCIS GOUVEIA, BÁRBARA.

Análise técnica e econômica de um protótipo de árvore solar fotovoltaica - 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia,

Departamento de Engenharia Elétrica. Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira.

1. Sistemas Fotovoltaicos 2. Árvore Solar 3. Universidade de Brasília  
I. ENE/FT/UnB II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

GOUVEIA, B. L. F. (2017). Análise técnica e econômica de um protótipo de árvore solar fotovoltaica, 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131p.

*Dedico este trabalho a todos que acreditam  
no potencial de transformação das pessoas  
e em um mundo melhor.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à minha família. Aos meus pais Andréa e Adjahy Junior pelo apoio incondicional, por estimularem a minha dedicação aos estudos e por estarem presentes em todas as conquistas. A minha irmã Amanda pelo carinho imensurável e também por ser o contraponto ideal a mim, oferecendo um jeito mais leve de encarar as coisas. Aos meus avôs Alexandre e Adjahy que sempre incentivaram meu aprendizado, tanto na escola, no curso e no que se aprende fora de sala de aula, com a experiência. Com essa experiência também tive o exemplo das minhas avós Neusa e “Tina”, e gostaria de agradecer muito a elas pelos cuidados gentis e pela devoção. Agradeço também, e muito, ao meu namorado Vinícius, a quem eu admiro e amo muito, por ter sido o meu apoio, minha força e minha maior motivação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira, por me apresentar a proposta de tema para o estudo em questão e pelo empenho em me orientar durante toda a realização do trabalho. Ao Prof. Dr. Rafael Shayani por ter propiciado o meu contato com a área de energias renováveis e por me apresentar oportunidades de desenvolvimento acadêmico na área durante os anos de curso na Universidade de Brasília. Ao Prof. Me. Ronaldo Chacon cuja dedicação na transmissão do conhecimento me serviu de inspiração, desde os tempos de empresa júnior.

Outro agradecimento especial é destinado a todos os funcionários que contribuíram para a execução desse trabalho com conhecimento, disposição e paciência. Aos técnicos da prefeitura do campus, Marinaldo, Elton, João, Pedro, Fidelis e a todos que de alguma forma estiveram envolvidos na confecção, no projeto e na instalação da árvore solar, que foram de uma dedicação sem igual, sempre muito gentis e que me ensinaram muito com a experiência prática. Aos funcionários da Direção da Faculdade de Tecnologia, em especial ao senhor Fábio Fortes, arquiteto da FT, por toda a ajuda e por ter sido sempre muito solícito, ao senhor Márcio de Alcântara pelo envolvimento com o projeto e ao diretor da FT, Prof. Dr. Antônio César Brasil Junior, pelo entusiasmo com a iniciativa de instalação da árvore solar.

Agradeço também a todos os colegas da Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição (SRD) da Aneel, onde estagiei, que não só me proporcionaram um desenvolvimento profissional, com o aprendizado de aspectos da regulação do Setor Elétrico, mas também promoveram um crescimento pessoal e me estimularam muito na realização deste trabalho. Ainda pelo desenvolvimento pessoal e profissional, muito obrigada à Enetec, que me proporcionou a oportunidade única de um aprendizado prático da engenharia, de trabalho com projetos e gestão em um ambiente tão familiar de amigos muito especiais.

E por falar em amizades, minha gratidão é dedicada também a todos amigos que fiz, ao longo do curso de Engenharia Elétrica e durante o tempo que passei no intercâmbio, que contribuíram direta ou indiretamente, para conquistas nesse período, incluindo a realização desse trabalho. Obrigada por terem sido uma parte fundamental do caminho que me trouxe até aqui, compartilhando momentos e experiências que levarei por toda a vida.

Finalmente, agradeço a Deus e a todas as coisas que alimentam a minha fé, que fazem de mim quem eu sou e que me movem para buscar os meus sonhos.

*“Você tem miolos na cabeça. Você tem pés em seus sapatos. Você pode ir em qualquer direção que escolher. Você está por sua conta. E você sabe o que você sabe. Você é o único que vai decidir para onde ir”.*

*Dr. Seuss*

## RESUMO

O uso de fontes renováveis para geração de energia vem apresentando tendência de crescimento no mundo durante os últimos anos. Debates em âmbito internacional sobre mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável motivam essa busca de diversificação da matriz energética mundial com energias alternativas que provoquem menos impacto no meio ambiente. Assim, a produção de energia elétrica a partir do sol com sistemas fotovoltaicos (SFVs) tem captado mais interesse de setores da sociedade e se mostrado cada vez mais viável técnica e economicamente. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre um sistema fotovoltaico na forma de uma árvore solar instalada na Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB), além da comparação através de análises técnicas e econômicas de dois casos, os quais diferem entre si com relação à orientação dos módulos. O caso 1 trata da estrutura teórica da árvore, enquanto o segundo representa o modelo real, construído e instalado na UnB. A análise técnica realizou a avaliação do recurso solar, localização do projeto, modelagem tridimensional, sombreamento, definição do arranjo, dimensionamento, simulação de operação e projeto elétrico. Já na análise econômica, foram feitos o levantamento dos preços dos componentes e gastos com a instalação, a avaliação do investimento inicial e o impacto da geração do SFV no consumo do prédio. Ambos os casos foram dimensionados com 24 módulos de 55 Wp e 1 inversor de 1,5 kW. O sistema da árvore do caso 1, conforme os resultados das simulações no PVSystem, é capaz de gerar 2.168 kWh por ano. Já no caso 2, a geração foi menor, um total de 1.869 kWh/ano, confirmando a maior eficiência do caso 1. Foram descritas as etapas de construção e implementação do protótipo e verificou-se que embora a maior parte das etapas tenha sido concluída, a burocracia no andamento dos processos atrasou a finalização do projeto. Quanto aos resultados da análise econômica, determinou-se que o investimento inicial do projeto da árvore solar, foi de R\$ 21.154,20 e o preço calculado por kWp foi igual a R\$ 16,03. Foi verificada ainda a economia mensal pelo SFV na conta de energia da UnB com valores de R\$ 108,78 para o caso 1 e R\$ 76,44 no caso 2. A proposta de uma árvore solar surge então para demonstrar as possibilidades de aproveitamento desse tipo de fonte na geração de energia limpa, com a integração de SFVs às mais diversas estruturas arquitetônicas, à paisagem urbana, com uma área menor se comparados com instalações tradicionais (em telhados ou fachadas de prédios) de mesma capacidade de geração.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos, Árvore Solar, Universidade de Brasília.

## ABSTRACT

The use of renewable sources for power generation has been showing a tendency of growth worldwide in recent years. The international debates on climate change and sustainable development motivate this search for diversification of the world energy matrix with alternative energies that cause less impact on the environment. Thus, the production of electric energy from the sun with photovoltaic systems (PV systems) has attracted more interest from sectors of society and has increasingly become technically and economically viable. This work aims to present a study on a photovoltaic system in the form of a solar tree installed in the Faculty of Technology (FT) of the University of Brasília (UnB). In addition, it contains a comparison with technical and economic analysis between two cases, which differ in respect to the orientation of the modules. The first case deals with the theoretical structure of the tree while the second represents the actual model, built and installed at UnB. The technical analysis carried out the evaluation of the solar resource, location of the project, three-dimensional modeling, shading, definition of the arrangement, sizing, simulation of operation and electrical *design*. Whereas, in the economic analysis, the prices of the components and expenditures with the installation, the initial investment and impact of the generation of the PV system on the consumption of the building were evaluated. Both cases were sized with 24 modules of 55 Wp and 1 inverter of 1,5 kW. The system of the tree from case 1, according to the simulation results from PVSyst, is able to generate 2.168 kWh per year. In case 2, the generation was lower, a total of 1.869 kWh/year, confirming the greater efficiency of case 1. The stages of construction and implementation of the prototype were described and it was verified that, although most of the stages were completed, the bureaucracy during the processes delayed the progress and the completion of the project. As for the results of the economic analysis, it was determined that the initial investment of the solar tree project was R\$ 21,154.20 and the price calculated per kWp was equal to R\$ 16.03. It was also verified the monthly savings by the SFV in the energy bill of UnB with values of R\$ 108.78 for case 1 and R\$ 76.44 for case 2. The proposal of a solar tree demonstrates the possibilities of using this type of source in the generation of clean energy, with the integration of PV systems to the most diverse architectural structures in the urban landscape, occupying a smaller area if compared to traditional installations (on roofs or buildings facades) with the same generation capacity.

**Keywords:** Photovoltaic Systems, Solar Tree, University of Brasília.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mudanças climáticas e gases do efeito estufa. ....	5
Figura 2.2 - 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU. ....	8
Figura 2.3 - Esquema de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. ....	17
Figura 2.4 - Principais ângulos da geometria solar. ....	20
Figura 2.5 - Ilustração do movimento de translação da Terra com destaque para a ocorrência das estações e para o ângulo de declinação solar. ....	21
Figura 2.6 - Mapa da média anual de Radiação solar no plano inclinado para o território brasileiro. ....	23
Figura 2.7 - Perfis de radiação solar diária e seus valores de HSP correspondentes. ....	25
Figura 2.8 - Mapa da média anual de Horas de Sol Pleno nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro. ....	26
Figura 2.9 - Composição de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino. ....	29
Figura 2.10 - Curva I-V característica de um módulo fotovoltaico. ....	30
Figura 2.11 - Associação em série e paralelo de células fotovoltaicas. ....	31
Figura 2.12 - Associação em série e paralelo de 1, 2 e 4 módulos fotovoltaicos. ....	32
Figura 2.13 - Efeitos da irradiância e temperatura sobre a tensão e a corrente nos módulos fotovoltaicos. ....	33
Figura 2.14 - Árvore solar de Gleisdorf, Áustria. ....	37
Figura 2.15 - Árvore solar da Universidade Estadual do Ceará. ....	38
Figura 2.16 - Árvore solar do CSIRs instalada na Índia. ....	39
Figura 2.17 - Árvore solar da Sunew. ....	40
Figura 3.1 - Fluxograma para análise técnica do projeto. ....	46
Figura 3.2 - Fluxograma das principais etapas do dimensionamento no PVSyst. ....	50
Figura 3.3 - Fluxograma da análise econômica do projeto. ....	53
Figura 3.4 - Composição do custo total de um SFV. ....	54
Figura 4.1 - Vistas do modelo da árvore solar obtidas a partir do seu modelo 3D. ....	61
Figura 4.2 - Vistas da Faculdade de Tecnologia obtidas a partir do seu modelo 3D. ....	62
Figura 4.3 - Fotografia aérea da Faculdade de Tecnologia da UnB com destaque para o local de instalação da árvore solar. ....	64
Figura 4.4 - Sombreamento no local para o dia 21 de junho às 9h, 13h e 16h. ....	65
Figura 4.5 - Indicação de sobredimensionamento do inversor no PVSyst. ....	69

Figura 4.6 - Indicação da ferramenta de definição da orientação dos painéis no PVSyst. .	71
Figura 4.7 - Esquemático da vista superior da Árvore Solar Fotovoltaica da FT. ....	72
Figura 4.8 - Modelo arquitetônico concebido da árvore solar na fase de pré-projeto. ....	75
Figura 4.9 - Partes desmontadas da estrutura da árvore solar da FT e destaque para um dos “galhos”. ....	77
Figura 4.10 - Obras para implementação da estrutura com destaques para parede de contenção, nivelamento do terreno, tubulão, fixação da haste principal e concretagem do piso. ....	78
Figura 4.11 - Arranjo final da estrutura montada da árvore solar da FT visto de direções distintas. ....	81
Figura 4.12 - Fluxograma das etapas de implementação da árvore solar da FT. ....	83
Figura 4.13 - Diagrama unifilar de interconexão dos módulos da árvore com o inversor - caso 1. ....	92
Figura 4.14 - Diagrama unifilar de interconexão dos módulos da árvore com o inversor - caso 2. ....	93

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Oferta Interna de Energia Elétrica – 2016 (%) .....	14
Gráfico 2.2 - Participação de cada fonte na Matriz de Energia Elétrica Brasileira .....	15
Gráfico 4.1 - Valores médios da irradiação solar diária para cada mês na cidade de Brasília .....	59
Gráfico 4.2 - Curvas de geração em um dia médio de cada mês – caso 1 .....	88
Gráfico 4.3 - Energia total gerada em cada mês – caso 1 .....	88
Gráfico 4.4 - Curvas de geração em um dia médio de cada mês – caso 2 .....	89
Gráfico 4.5 - Energia total gerada em cada mês – caso 2 .....	89
Gráfico 4.6 - Balanços de carbono para os casos 1 e 2 estimados pelo PVSyst .....	90
Gráfico 4.7 - Curvas de energia gerada em um dia médio do ano (casos 1 e 2) .....	94
Gráfico 4.8 - Curvas de energia gerada em um dia para melhor mês, mês crítico e mês médio (caso 1) .....	95
Gráfico 4.9 - Curvas de energia gerada em um dia para melhor mês, mês crítico e mês médio (caso 2) .....	95
Gráfico 4.10 - Custos percentuais dos componentes do SFV .....	99
Gráfico 4.11 - Custos percentuais dos materiais de construção da base .....	99
Gráfico 4.12 - Custos percentuais dos serviços de construção e instalação do projeto .....	100
Gráfico 4.13 - Custos percentuais do projeto .....	101



Tabela III.3 - Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de um mês médio – caso 1 .....	129
Tabela III.4 - Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de setembro (melhor mês) – caso 2 .....	129
Tabela III.5 - Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de novembro (mês crítico) – caso 2 .....	130
Tabela IV.1 - Economia do SFV do caso 1 considerando as bandeiras tarifárias dos últimos meses .....	131
Tabela IV.2 - Economia do SFV do caso 2 considerando as bandeiras tarifárias dos últimos meses .....	131

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BOS	<i>Balance of System</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEB	Companhia Energética de Brasília
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CH <sub>4</sub>	Metano
CONFAZ	Conselho Fazendário de Política Econômica
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
CPV	<i>Concentrated Photovoltaics</i>
CRESCESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DF	Distrito Federal
DHI	Irradiação Difusa Horizontal – <i>Horizontal Diffuse Irradiation</i>
DNI	Irradiação Difusa Normal – <i>Normal Diffuse Irradiation</i>
DSSC	<i>Dye-Sensitized Solar Cell</i>
EVA	<i>Ethylene-vinyl acetate</i>
Finame	Programa de Financiamento de Máquinas e Equipamentos
FT	Faculdade de Tecnologia
GHI	Irradiação Global Horizontal - Horizontal Global Irradiation
GW	Gigawatt
HSP	Horas de Sol Pleno
I	Corrente
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora

kWp	Quilowatt-pico
LID	Degradação do Módulo por Luz ( <i>Light Induced Degradation</i> )
MIGDI	Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
NBR	Norma Brasileira
NDC	Contribuições Nacionalmente Determinadas – <i>Nationally Determined Contributions</i>
NR	Norma Regulamentadora
N2O	Óxido Nitroso
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
O&M	Operação e Manutenção
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
ONU	Organização das Nações Unidas
OPV	<i>Organic Photovoltaics</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PR	<i>Performance Ratio</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da Aneel
PROGD	Programa de Geração Distribuída
REN	Resolução Normativa
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SFV	Sistema Fotovoltaico
SIGFI	Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TJLP	Taxa de Juros de Longo Prazo
UFSC	Universidade Federal de Santa
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UnB	Universidade de Brasília
USP	Universidade de São Paulo
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
THD	Distorção Harmônica Total
TWh	Terawatt-hora
V	Volt
VPL	Valor Presente Líquido
W	Watt
Wp	Watt-pico
WWF	World Wide Fund
3D	Três Dimensões

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Panorama global do uso de energias renováveis e mudanças climáticas</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Energia solar fotovoltaica e sua inserção no contexto energético brasileiro</b>	<b>9</b>
2.2.1	Histórico da instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil	10
2.2.2	Programas e políticas de incentivo	12
2.2.3	Situação atual da matriz energética brasileira e possibilidades futuras	13
<b>2.3</b>	<b>Micro e minigeração distribuída</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Sistema fotovoltaico conectado à rede</b>	<b>17</b>
<b>2.5</b>	<b>Geração de energia solar e componentes de SFCR</b>	<b>18</b>
2.5.1	Recurso solar no Brasil (com destaque para o DF)	19
2.5.2	Materiais e tecnologia fotovoltaica	27
2.5.3	Módulos	28
2.5.4	Inversores	33
<b>2.6</b>	<b>Árvores Solares Fotovoltaicas</b>	<b>36</b>
2.6.1	Projetos similares no Brasil e no mundo	38
<b>2.7</b>	<b>Considerações finais do capítulo</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS UTILIZADOS</b>	<b>42</b>
3.1.1	SketchUp	42
3.1.2	PVSyst	43
3.1.3	AutoCAD	44
3.1.4	Excel®	44
<b>3.2</b>	<b>MÉTODO UTILIZADO</b>	<b>44</b>
3.2.1	Pré-execução do projeto	45
3.2.2	Metodologia da análise técnica	45
3.2.2.1	Avaliação do recurso solar	47
3.2.2.2	Localização	47
3.2.2.3	Modelagem 3D	48
3.2.2.4	Estudo de sombreamento	48
3.2.2.5	Definição da configuração	49
3.2.2.6	Dimensionamento do sistema	49
3.2.2.7	Concepção, construção e implementação da árvore solar na FT	50
3.2.2.8	Simulação de operação	51
3.2.2.9	Projeto elétrico	51
3.2.2.10	Alocação de Cargas	52
3.2.3	Metodologia da análise econômica	52
3.2.3.1	Levantamento dos preços dos componentes do SFV	53
3.2.3.2	Levantamento dos gastos com a instalação	54
3.2.3.3	Avaliação do investimento inicial	55
3.2.3.4	Análise do impacto econômico do SFV no consumo energético	55
3.2.3.5	Elaboração do fluxo de caixa	55
3.2.3.6	Análise de viabilidade econômica do projeto	56
3.2.3.6.1	Valor de <i>Payback</i>	56
3.2.3.6.2	Valor Presente Líquido (VPL)	56
3.2.3.6.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	57
<b>3.3</b>	<b>Considerações finais do capítulo</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>59</b>

<b>4.1</b>	<b>RESULTADOS DA ANÁLISE TÉCNICA .....</b>	<b>59</b>
4.1.1	Avaliação do Recurso Solar .....	59
4.1.2	Localização .....	60
4.1.3	Modelo 3D .....	60
4.1.4	Estudo de sombreamento .....	63
4.1.5	Dimensionamento .....	66
4.1.6	Definição da configuração.....	70
4.1.7	Concepção, construção e instalação da árvore solar na FT.....	75
4.1.8	Simulação .....	83
4.1.9	Projeto Elétrico .....	90
4.1.10	Alocação de Cargas .....	94
<b>4.2</b>	<b>RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA.....</b>	<b>98</b>
4.2.1	Levantamento do Investimento Inicial .....	98
4.2.2	Impacto econômico da geração solar no consumo energético .....	101
<b>4.3</b>	<b>Considerações Finais do capítulo .....</b>	<b>107</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>110</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>117</b>
<b>I.</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS MODELOS DE PAINÉIS E INVERSOR (INFORMAÇÕES DOS FABRICANTES) .....</b>	<b>118</b>
<b>II.</b>	<b>RELATÓRIOS DAS SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO DA ÁRVORE SOLAR (CASOS 1 E 2) .....</b>	<b>121</b>
<b>III.</b>	<b>TABELAS DE ALOCAÇÃO DE CARGAS .....</b>	<b>127</b>
<b>IV.</b>	<b>TABELAS DE ECONOMIA DO SFV CONSIDERANDO AS BANDEIRAS TARIFÁRIAS VIGENTES .....</b>	<b>130</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve como principal motivação um tema bastante discutido no contexto global da atualidade: o uso de fontes renováveis e limpas para geração de energia elétrica, mais especificamente, aquela produzida a partir da energia fornecida pelo Sol com sistemas fotovoltaicos.

O apelo pelo uso de fontes renováveis é crescente, principalmente com a verificação, nos últimos anos, do aumento da poluição na atmosfera e das mudanças climáticas. Tais fenômenos apresentam uma relação direta com a intensa exploração dos combustíveis fósseis para compor a matriz energética mundial e a emissão de gases causadores do efeito estufa ao longo do tempo. Iniciativas da Organização das Nações Unidas (ONU) incentivaram a discussão a nível mundial sobre o tema com a formalização de ações de mitigação dos danos ambientais através de acordos e da elaboração dos chamados ‘objetivos para o desenvolvimento sustentável’.

No âmbito deste trabalho, consideram-se aspectos como buscar o aumento da participação das energias renováveis, o desenvolvimento da tecnologia para produção de energia limpa, o uso eficiente dos recursos naturais e uma maior conscientização sobre os impactos das ações humanas no clima.

Nesse sentido, a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede na forma de uma árvore solar surge para demonstrar as possibilidades de aproveitamento desse tipo de fonte renovável na geração de energia limpa. SFVs podem ser integrados às mais diversas estruturas arquitetônicas. Um modelo cujo *design* remete a uma árvore apresenta peculiaridades, mas também pode mostrar vantagens que vão além das esperadas com a instalação de um SFV, como uma possível economia de espaço.

Apesar da ideia de uma árvore solar se mostrar notável do ponto de vista ambiental e arquitetônico, é necessário apresentar uma metodologia para avaliar os aspectos técnicos presentes em um projeto desse tipo, bem como sua viabilidade econômica. Deve-se determinar a eficiência do sistema quanto à sua capacidade de geração e verificar de que forma eventuais mudanças no projeto, no arranjo ou no *design* poderiam aumentar seu rendimento.

O objetivo geral deste trabalho é, portanto, apresentar um projeto de instalação de uma árvore solar fotovoltaica conectada à rede elétrica na Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília e sugerir uma metodologia para avaliação técnica e econômica do sistema.

Além da motivação já citada de estudar um tema relacionado à energia solar, o projeto realizado neste trabalho foi incentivado também pela proposta de dar sequência a estudos feitos anteriormente, em que especificações técnicas relativas à instalação de uma árvore solar na FT já haviam sido discutidas.

Assim, o estudo feito neste trabalho teve como alicerces a avaliação da instalação e do desempenho da Árvore Solar Fotovoltaica da FT, além da comparação de dois modelos arquitetônicos para o projeto (referidos mais à frente como casos 1 e 2), os quais diferem entre si apenas com relação à orientação dos módulos fotovoltaicos. O primeiro caso refere-se à estrutura teórica da árvore enquanto o segundo representa o modelo real, tal como foi construído e instalado na UnB. Os resultados de ambos os casos de estudo poderão ser avaliados do ponto de vista técnico e econômico e as análises sobre eles, levadas em consideração para futuras replicações do projeto da árvore solar.

Dentre os métodos sugeridos neste trabalho para atingir seu principal objetivo, apresenta-se uma análise técnica composta de etapas como: avaliação do recurso solar no local previsto em projeto, estudo de sombreamento, dimensionamento e definição do arranjo do sistema, assim como a simulação de sua operação. Apresenta-se também uma análise econômica em que se discute os custos do projeto e da energia por ele gerada.

Já dentre os principais materiais, ou ferramentas computacionais, utilizados na análise técnica, podem-se citar o SketchUp e o PVSyst. O primeiro possibilitou a elaboração de modelos tridimensionais em computador da árvore solar e de seu local de instalação, bem como o estudo da projeção de sombras sobre o protótipo. A utilização do segundo serviu para fazer o dimensionamento e a simulação de funcionamento do sistema fotovoltaico da árvore solar a partir de uma descrição detalhada dos seus componentes devido ao fato de o *software* possuir, dentre suas funcionalidades, uma ampla base de dados de equipamentos para SFVs e de condições meteorológicas para várias cidades no mundo.

Para conduzir o entendimento do que é tratado neste trabalho, organizou-se a sua estrutura de forma a apresentar os temas, os materiais e metodologia empregados, os resultados e as análises realizadas. Dessa forma, dividiu-se o texto em 5 capítulos e mais uma seção com apêndices. Na sequência do presente capítulo, que trata da introdução, tem-se o capítulo 2, em que são apresentados conceitos-chave relacionados a sistemas fotovoltaicos, o contexto geral no qual o trabalho está inserido e o “estado da arte” do tema abordado.

Logo em seguida, o capítulo 3 traz de forma detalhada a metodologia e os materiais adotados para avaliar os aspectos do projeto e da implementação da árvore solar fotovoltaica na Faculdade de Tecnologia, assim como a eficiência e o desempenho do sistema. Já o capítulo

4 discute os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos e do uso das ferramentas de análise.

O último capítulo retoma as discussões anteriores e reúne as conclusões tomadas a partir dos resultados das análises técnica e econômica do projeto da árvore solar realizadas no trabalho. Neste capítulo também são propostos tópicos de estudos futuros para aprofundamento de aspectos do projeto ou que apresentem alguma interdisciplinaridade com o tema.

Finalmente, na seção de apêndices encontram-se as especificações técnicas dos componentes do projeto da árvore solar tal como são fornecidas pelos seus respectivos fabricantes e os relatórios completos de desempenho do sistema obtidos com a simulação realizada com auxílio do PVSyst para cada um dos casos em estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem por objetivo apresentar conceitos importantes para o entendimento do trabalho e explicar o contexto no qual ele está inserido. O chamado “estado da arte” do tema abordado, o que existe de semelhante e o que embasa a realização dos estudos de caso desse trabalho também são tópicos a serem esclarecidos neste capítulo.

### 2.1 Panorama global do uso de energias renováveis e mudanças climáticas

Energia renovável é qualquer forma de energia de fonte solar, geofísica ou biológica cujo reabastecimento ocorre através de processos naturais e em uma taxa que se iguala com ou excede sua taxa de uso (IPCC, 2011).

Ela é obtida a partir de um fluxo de energia contínuo ou repetitivo que ocorre naturalmente no meio-ambiente e inclui recursos como a biomassa, energia solar, calor geotérmico, fonte hídrica, marés, ondas, energia térmica do oceano e energia eólica. É possível, entretanto, utilizar biomassa em uma taxa maior do que ela pode ser produzida, ou extrair calor de uma fonte geotérmica mais rapidamente do que os fluxos de calor podem reabastecê-la (IPCC, 2011).

Por outro lado, tomando-se o exemplo da energia solar, tem-se que a sua taxa de utilização não esgota, ainda que momentaneamente, a fonte. Ou seja, não é possível usar luz ou calor do sol mais rápido do que a fonte é capaz de prover.

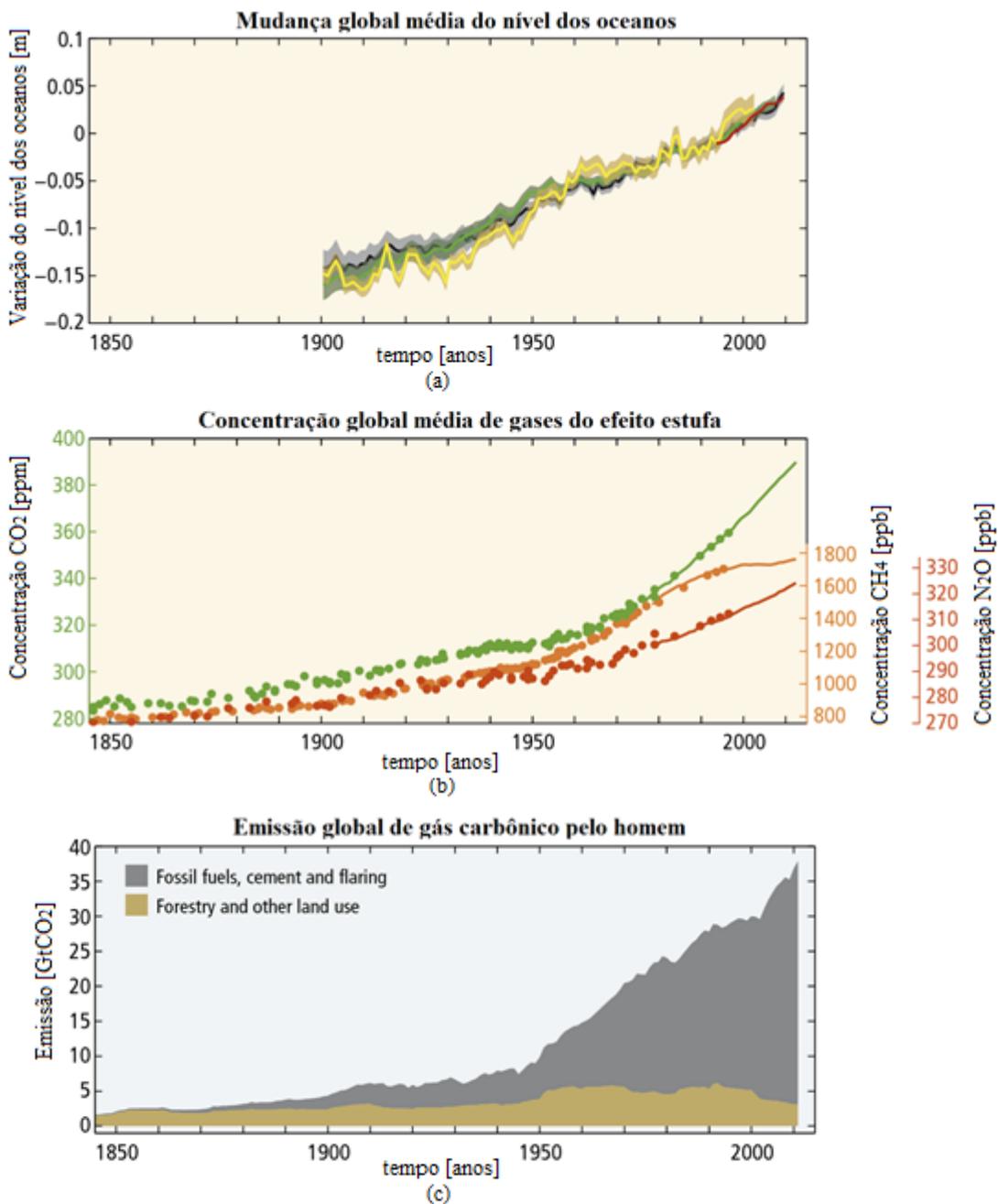
Do ponto de vista do abastecimento energético mundial, as fontes renováveis têm um papel muito importante, pois a exploração delas não oferece risco de esgotamento. Além disso, embora as energias renováveis ainda não sejam exploradas em escala maior do que os combustíveis fósseis, elas representam um complemento para uma demanda de energia cada vez maior no mundo e uma possibilidade de expansão do setor.

Considerando agora o ponto de vista da sustentabilidade, sabe-se que é fundamental que as fontes de energia não sejam apenas renováveis, mas que sejam fontes limpas também. Vive-se uma época em que os efeitos das mudanças climáticas no planeta são cada vez mais perceptíveis e frequentes, o que faz com que seja imprescindível que as atividades humanas (dentre elas, a geração de energia) provoquem menos impacto no meio ambiente. Nesse contexto, o uso de fontes renováveis de energia para a produção de eletricidade em substituição aos combustíveis fósseis colabora com a redução da emissão de poluentes na atmosfera e reduz

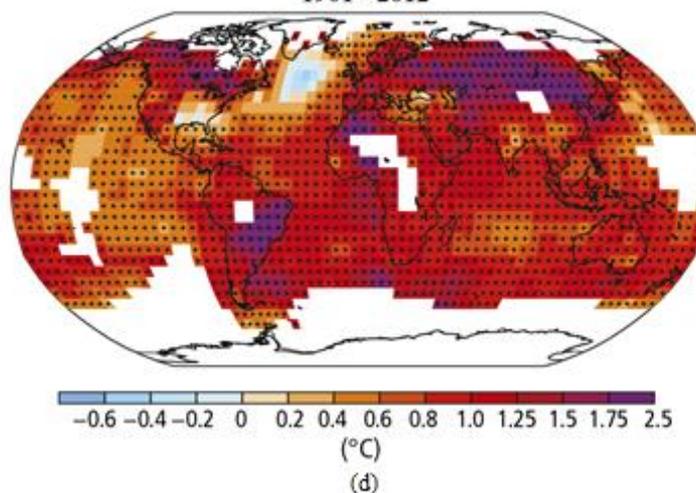
o chamado efeito estufa, apontado como responsável pela elevação da temperatura do planeta e por mudanças climáticas observadas em todo o globo terrestre (Villalva, 2015).

A Figura 2.1 apresenta gráficos das mudanças climáticas na forma do aumento no nível dos oceanos e da temperatura na superfície da Terra, além de trazer dados sobre a concentração de gases causadores do efeito estufa – gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) – e as emissões de  $\text{CO}_2$  a partir de ações humanas.

Figura 2.1 – Mudanças climáticas e gases do efeito estufa – (a) Mudança global média no nível dos oceanos, (b) Concentração global média de gases do efeito estufa, (c) Emissão global de gás carbônico pelo homem e (d) Mudança observada da temperatura da superfície terrestre.



Mudança observada da temperatura da superfície terrestre  
1901 - 2012



Fonte: *Climate Change 2014: Synthesis Report, IPCC (editado pela autora)* – Original disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr> - Acesso em: 02/10/2017

O potencial das energias renováveis é muito maior do que toda a energia que é usada por todas as economias da Terra (IPCC, 2011). O desafio está em captá-las e usá-las para suprir a demanda mundial de forma que seja vantajoso economicamente. Infelizmente, interesses e argumentos econômicos ainda têm mais peso do que aqueles baseados em sustentabilidade e mitigação dos impactos ambientais.

A partir das últimas décadas, a Organização das Nações Unidas (ONU) passou a buscar a conscientização dos países em relação a questões ambientais. Os esforços da organização foram traduzidos, inicialmente, na realização de conferências internacionais sobre o tema e a primeira delas foi sediada na cidade de Estocolmo, em 1972. No final dos anos 80, outras sucederam e passaram a tratar dos alertas da comunidade científica sobre o efeito estufa e as mudanças climáticas ocasionadas pela ação humana. Na conferência Rio-92, uma das maiores conferências para questões ambientais, foi consolidada uma agenda global para o meio ambiente. Nos anos que se seguiram, surgiu o modelo de “Conferência das Partes”, as chamadas COPs e a COP-3, ocorrida no Japão, ficou famosa pela elaboração do “Protocolo de Kyoto”. Este documento estabeleceu metas bastante específicas de redução de gases do efeito estufa e teve boa aceitação dos países presentes.

Nas COPs seguintes houve um aprofundamento dos debates sobre o tema e algumas medidas foram tomadas para tentar garantir as metas anteriormente fixadas. Acordos foram firmados, compromissos assumidos (em que vale ressaltar a participação dos países em desenvolvimento, dentre os quais o Brasil) e um fundo para promover o investimento de recursos dos países desenvolvidos em ações que reduzam as mudanças climáticas foi criado.

O ano de 2015 viu importantes passos serem dados na direção do desenvolvimento aliado à sustentabilidade. Durante a realização da COP-21, em Paris, foi assinado um acordo em que 195 países se comprometeram com metas mais rigorosas para limitar o aumento da temperatura global. O acordo internacional do clima, ou “Acordo de Paris” como ficou conhecido, apresentou o objetivo claro de manter em menos de 2°C o aumento da temperatura média de todo o planeta, com esforços para limitá-lo a 1,5°C. A fim de atingir essa meta, os governos dos países elaboraram seus próprios compromissos individuais, nos quais apresentaram ações que consideraram viáveis dados seus contextos sociais e econômicos.

Os compromissos de cada país foram reunidos em um documento chamado Contribuições Nacionalmente Determinadas (cujas sigla em inglês é NDC). A NDC do Brasil estipulou as metas para reduzir em 37% as emissões de carbono até 2025 e em 43% até 2030, tendo como base a quantidade emitida em 2005. Algumas medidas a serem adotadas para cumprir as metas são: aumentar a participação das energias renováveis na matriz energética brasileira, realizar o reflorestamento de áreas desmatadas, alcançar uma maior eficiência no setor elétrico, promover a utilização de tecnologias limpas nas indústrias, entre outras (MMA, 2017).

Ainda no contexto das ações da ONU para promover melhores condições de vida e cuidados com o planeta, foi elaborada, em setembro de 2015, a chamada “Agenda 2030”, um plano de ação com foco nas pessoas, no planeta e na prosperidade. O documento lista os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e suas 169 metas, além de apresentar meios para implementação, proposta de parcerias globais, e um roteiro para acompanhamento e revisão dos objetivos. Na agenda, tais objetivos foram organizados de forma a equilibrar os três pilares do desenvolvimento sustentável – o social, o econômico e o ambiental. Espera-se que eles orientem as políticas internas e de cooperação internacional pelos próximos quinze anos e que sejam alcançados até 2030, justificando o nome da Agenda.

De forma resumida, os ODS contemplam os seguintes temas: erradicação da pobreza e da fome, saúde e bem-estar, educação, igualdade de gênero, água e saneamento, energia acessível e limpa, redução das desigualdades, emprego, inovação na indústria, consumo e produção responsáveis, comunidades sustentáveis, combate às alterações no clima, proteção dos ecossistemas terrestres e marítimos, paz, justiça e parcerias em prol das metas.

Figura 2.2 - 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.



Fonte: Site das Nações Unidas – Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015> - Acesso em: 02/10/2017

Observa-se que a promoção do uso de energias renováveis e do combate às mudanças climáticas, com a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera e dos danos que a produção energética pode causar ao meio ambiente, vão ao encontro de alguns dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Mais especificamente, com dos objetivos descritos a seguir:

- Objetivo 7 – Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos.

Segundo esse objetivo espera-se, até 2030, realizar ações como: aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética global; dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética; reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa (ONU, 2015).

- Objetivo 11 – Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.

O objetivo 11 pretende, entre outras coisas: aumentar a urbanização inclusiva e sustentável; fortalecer esforços para proteger o patrimônio cultural e natural do mundo; reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros; até 2020, aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos

integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas, a resiliência a desastres (ONU, 2015).

- Objetivo 12 – Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.

Este objetivo engloba ações tais como: alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais; reduzir a liberação de resíduos para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente; reduzir inclusive a geração desses resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso; racionalizar subsídios ineficientes aos combustíveis fósseis, que encorajam o consumo exagerado (ONU, 2015).

- Objetivo 13 – Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos.

Finalmente, de acordo com o objetivo 13, atitudes a serem tomadas nesse âmbito são: integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais; melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima; implementar o compromisso assumido pelos países desenvolvidos partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima [UNFCCC] (ONU, 2015).

Cabe salientar, no entanto, que apesar de os objetivos citados se relacionarem diretamente com os temas de energia renovável e redução de impactos ao meio ambiente, todos os 17 possuem contribuições relevantes para a sustentabilidade como um todo e as ações de todos estão relacionadas entre si. Verifica-se então que a promoção de projetos que utilizem fontes renováveis, tal qual é o caso do presente trabalho, está bastante alinhada com metas internacionais para o desenvolvimento sustentável.

## **2.2 Energia solar fotovoltaica e sua inserção no contexto energético brasileiro**

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão (CRESESB, 2014). Em um sistema fotovoltaico (SFV), a captação direta da luz solar gera corrente elétrica, que é então coletada, processada por equipamentos como controladores e conversores, armazenada em baterias ou fornecida à rede elétrica, dependendo do tipo de SFV.

Como fonte de energia, o sol apresenta maior regularidade na geração de eletricidade do que, por exemplo, o vento para a energia eólica. Além disso, os sistemas fotovoltaicos podem

ser empregados no território brasileiro como um todo, uma vez que o País possui taxas significativas de irradiação solar em todas as suas regiões.

O uso da energia solar como fonte alternativa e renovável vem crescendo no mundo todo. Tal popularização dos sistemas fotovoltaicos tem reflexos significativos na diminuição dos preços de seus componentes o que, por sua vez, torna a influenciar uma implementação em maior escala da geração fotovoltaica. Sabe-se, no entanto, que a redução do custo da energia gerada por fontes fotovoltaicas através do aumento da quantidade de sistemas que utilizem essa tecnologia não é o único desafio a ser superado.

Há também questões técnicas e políticas que ainda precisam ser observadas como a possibilidade de ampliação da vida útil e melhora da durabilidade do SFV mantendo a sua eficiência, além da necessidade de regulamentações, normas, e programas de incentivo para projetos que utilizem energia solar (ou fontes renováveis em geral), através da concessão de subsídios, isenção de impostos e créditos em financiamento (Villalva, 2015).

A seguir avaliam-se aspectos tais como o que já foi feito em termos desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no país, a atual situação da inserção desta fonte na matriz elétrica brasileira e o potencial de crescimento na área.

### **2.2.1 Histórico da instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil**

No Brasil, a inserção da fonte solar fotovoltaica para gerar energia começou com o objetivo de atender, em sua maior parte, regiões de difícil acesso em que não era viável, do ponto de vista econômico, a implementação de linhas de distribuição. Assim, áreas que não eram atendidas pelas concessionárias de energia locais, passaram a contar com pequenos sistemas isolados ou autônomos de geração solar fotovoltaica.

No ano de 1994, surgiu a primeira iniciativa nesse âmbito de eletrificação rural. O Ministério de Minas e Energia, criou o Prodeem (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), que tinha por objetivo promover o fornecimento de energia elétrica em áreas isoladas através, em sua maioria, de sistemas fotovoltaicos. O programa teve o apoio de universidades, centros de pesquisa, secretarias estaduais de energia e concessionárias federais e estaduais, e contou com a aquisição de mais de 8.500 sistemas fotovoltaicos (CRESESB, 2014).

A partir de 2002, houve uma movimentação por parte da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) para regulamentar a instalação de SIGFIs (Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes). Dos estudos realizados pela agência surgiu, em

2004, uma primeira resolução normativa do tema, a REN nº 83/2004, que posteriormente foi substituída pela REN nº 493/2012, para incluir também os MIGDIs (Microsistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica).

A eletricidade para prover propriedades rurais, comunidades em locais isolados, bombeamento de água, centrais de telecomunicações e monitoramento remotos e sistemas de sinalização são exemplos de adoção de sistemas fotovoltaicos autônomos no país, o que passou a ser adotado em maior escala a partir do programa “Luz Para Todos” em 2003 pelo Governo Federal. Nesse contexto de universalização do acesso à energia elétrica, milhares de SIGFIs foram instalados nos estados da Bahia e de Minas Gerais e em comunidades e reservas na região Norte.

Ao longo do tempo, entretanto, percebeu-se que, apesar de os sistemas isolados e autônomos serem fundamentais como solução para localidades não atendidas por sistemas de distribuição de energia elétrica, o uso mais proveitoso de um sistema fotovoltaico ocorre quando ele é conectado à rede. Por meio desse modelo, não só os investimentos em mais linhas de transmissão para a energia proveniente das grandes centrais geradoras são evitados (o que acontece para SFVs em geral), mas também a rede de distribuição passa a funcionar como uma bateria virtual e de grande capacidade de armazenamento. Assim, a unidade consumidora que instala um SFV conectado à rede elétrica pode ter sua produção energética excedente armazenada pela rede e o fornecimento de energia garantido para situações em que a geração for insuficiente em relação à demanda. Outra vantagem é que esse tipo de sistema oferece um retorno do investimento por meio de uma economia significativa com a conta de luz.

Foi a partir dos últimos anos da década de 1990 que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFRCs) foram instalados pela primeira vez no Brasil. Distribuidoras de energia elétrica, universidades e centros de pesquisa receberam os projetos pioneiros desse tipo de SFV. Exemplos disso são o sistema fotovoltaico de 11 kWp instalado na sede da Chesf (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) em 1995, e outros instalados nos campi da USP (São Paulo, SP), da UFSC (Florianópolis, SC) e da UFRGS (Porto Alegre, RS), apenas para citar alguns (CRESESB, 2014).

Um passo importante na evolução dos sistemas conectados à rede foi dado a partir de 2011 quando a Aneel lançou um projeto estratégico denominado “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”. Foi uma iniciativa em parceria com concessionárias de energia elétrica com o objetivo de incentivar a instalação de usinas fotovoltaicas experimentais em diferentes regiões do País e interligadas à rede. Mais recentemente, tem-se observado um crescimento dos sistemas desse tipo,

principalmente após a entrada em vigor da Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 da Aneel (recentemente atualizada para sua nova versão, a REN nº 687/2015), tratada em maiores detalhes no item 2.3, que determinou a regulamentação para sistemas de geração de pequeno porte conectados à rede de distribuição.

### **2.2.2 Programas e políticas de incentivo**

Para a continuidade e desenvolvimento do uso de energia fotovoltaica no Brasil alguns incentivos à evolução da tecnologia empregada, à produção de equipamentos e à ampla instalação de sistemas ou usinas de fonte solar são de grande importância.

Algumas iniciativas já foram tomadas nesse sentido – como os programas governamentais de desenvolvimento e de ampliação do fornecimento de energia, os estímulos à pesquisa e as resoluções do órgão regulador do setor elétrico, que foram citados anteriormente. Ainda há, contudo, muito espaço para o uso de energia solar fotovoltaica crescer no Brasil.

A perspectiva do mercado nacional de energia solar e a possibilidade de financiamento pelo Finame (Programa de Financiamento de Máquinas e Equipamentos) do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento), junto com outros incentivos para a instalação de indústrias em setores estratégicos, têm atraído a atenção de fabricantes mundiais de painéis solares e inversores eletrônicos no País (Villalva, 2015).

Além do fomento à importação ou até mesmo à fabricação de equipamentos para SFVs, já existem programas de financiamento para projetos de alto custo, como as linhas “Fundo Clima” e “Energias Alternativas” do BNDES e a linha “Fundo Verde” da Agência de Desenvolvimento do Estado de São Paulo (Villalva, 2015). É necessário, contudo, elaborar soluções para incentivar a geração, principalmente de pequenos produtores, sejam pessoas físicas ou jurídicas, através de micro ou minissistemas de geração fotovoltaica.

Nesse sentido, foram anunciados, em abril de 2015, esforços do Confaz (Conselho Fazendário de Política Econômica) para eliminar os encargos tributários sobre a energia produzida por sistemas de pequeno porte. Atualmente, a energia exportada por esses sistemas ainda é tributada por impostos estaduais (ICMS) e federais (PIS, Cofins) (Villalva, 2015). Já existe, porém, um item na Resolução nº 482/2012 que regulamenta um desconto de 80% sobre algumas tarifas de transmissão e distribuição de energia elétrica para projetos de geração solar que entrem em operação comercial até o final de 2017.

Até o momento, o que se tem de mais concreto em termos de incentivos é o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), lançado em

dezembro de 2015, para ampliar e aprofundar as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia (em especial a solar fotovoltaica) (MME, 2015). O ProGD formaliza o compromisso de movimentar pouco mais de R\$ 100 bilhões em investimentos para que, até 2030, 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão gerar a própria energia que consomem, o que pode então resultar em 23.500 MW (48 TWh produzidos) de energia limpa e renovável, o equivalente à metade da geração da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Assim, o Brasil pode evitar a emissão de 29 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera (MME, 2015).

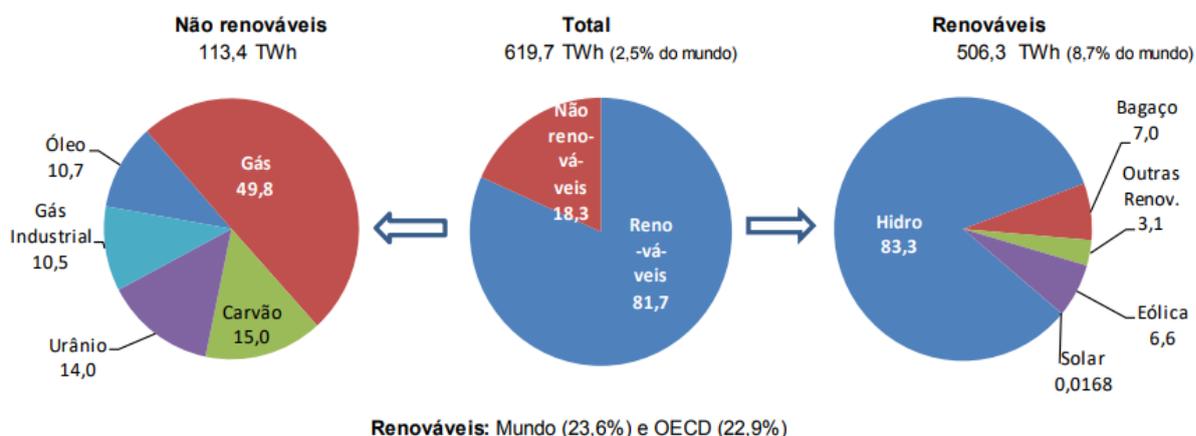
### **2.2.3 Situação atual da matriz energética brasileira e possibilidades futuras**

O Brasil é um país de dimensões continentais que é bastante privilegiado por apresentar muitos recursos naturais. A geografia e as condições climáticas também contribuem para a exploração de fontes renováveis na geração de energia. Pode-se dizer que a produção de energia elétrica no Brasil já emprega, em sua maior parte, fontes limpas e renováveis, na medida em que quase toda a eletricidade gerada no país é obtida através de usinas hidrelétricas.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, em 2016, a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) ficou em 619,7 TWh. Uma análise por fonte, em relação a 2015, mostra que houve aumentos de 54,9% na oferta por eólica, de 44,7% por solar, de 7,7% por nuclear e as ofertas por óleo fóssil, gás natural e carvão mineral recuaram. A supremacia da geração hidráulica ficou mais acentuada em 2016, ficando com cerca de 67,1% na estrutura da OIEE (incluindo a importação de Itaipu), contra os 64% verificados em 2015 (MME, 2017).

Ainda em 2016 as fontes renováveis chegaram a 81,7% de participação na matriz de OIEE, um aumento de 6,2 pontos percentuais em relação a 2015. A oferta de eólica e bagaço somou 11,1% na OIEE de 2016 – por semestre, este indicador ficou entre 5 e 6% no primeiro, e entre 14 e 16% no segundo, complementar, portanto, à oferta hidráulica, com dinâmica oposta por semestre. É importante destacar, no entanto, que apesar de o Brasil ter a maior parcela de sua oferta de energia elétrica por fontes renováveis e apesar da alta taxa de crescimento da oferta por energia solar, verifica-se que ela ainda é pouco significativa na matriz, o que pode ser observado no Gráfico 2.1 (MME, 2017).

Gráfico 2.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica – 2016 (%).



Fonte: Resenha Energética Brasileira, Exercício de 2016, edição de junho de 2017 – Disponível em: <http://www.mme.gov.br> - Acesso em: 11/10/2017

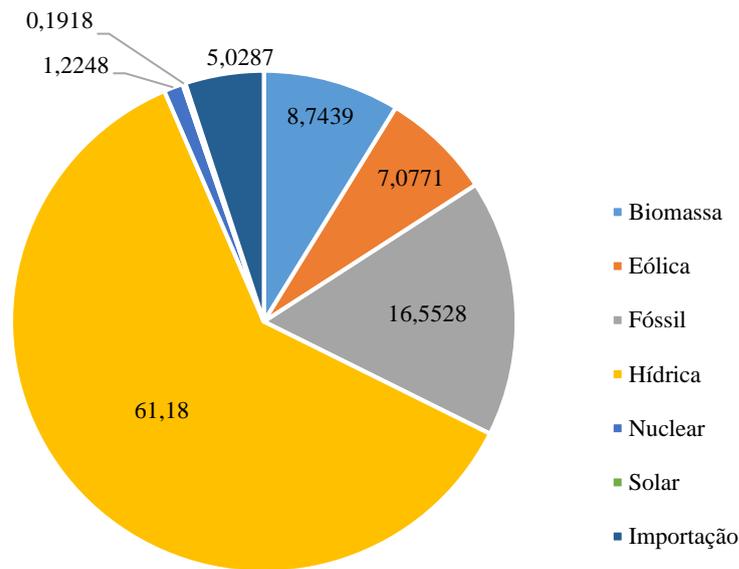
Dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da Aneel corroboram tal fato na medida em que mostram que, a partir dos empreendimentos em operação atualmente, o Brasil gera cerca de 154,297 GW, dentre os quais apenas 311,732 MW vêm de centrais geradoras solares fotovoltaicas. Tal valor corresponde a aproximadamente 0,2% do total gerado. A Tabela 2.1 a seguir apresenta os dados atualizados da Aneel para a Matriz de Energia Elétrica Brasileira e o Gráfico 2.2 ilustra a participação de cada uma das fontes.

Tabela 2.1 – Dados da Matriz de Energia Elétrica Brasileira.

Fonte	Nº de usinas	Potência [kW]	Percentual [%]
<b>Biomassa</b>	536	14.206.367,00	8,7439
<b>Eólica</b>	470	11.498.043,00	7,0771
<b>Fóssil</b>	2397	26.893.293,00	16,5528
<b>Hídrica</b>	1268	99.397.882,00	61,18
<b>Nuclear</b>	2	1.990.000,00	1,2248
<b>Solar</b>	60	311.732,00	0,1918
<b>Importação</b>	-	8.170.000,00	5,0287
<b>Total</b>	4733	162.467.317,00	100

Fonte: BIG- Aneel de 12/10/2017 – Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>  
Acesso em: 16/10/2017.

Gráfico 2.2 – Participação de cada fonte na Matriz de Energia Elétrica Brasileira.



Fonte: Gráfico produzido com auxílio do MS Excel a partir dos dados do BIG- Aneel de 12/10/2017 - Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm> - Acesso em: 16/10/2017.

Existe, portanto, muito espaço para o crescimento da exploração da energia solar fotovoltaica no Brasil. Além de ser uma fonte alternativa, a energia fotovoltaica é uma opção cada vez mais viável para complementar e ampliar a geração de eletricidade (Villalva, 2015).

Ainda segundo dados do BIG, um número bastante significativo de empreendimentos em geração fotovoltaica encontra-se em construção: 32 centrais com uma potência outorgada de 911,4 MW (8,13% da potência relativa a todos os empreendimentos que estão sendo construídos, que é de 11.215,582 MW). Com isso, a participação da energia solar na matriz pode, em breve, ser de aproximadamente 0,74%. Considerando também as centrais com construção prevista, porém ainda não iniciada, seria possível alcançar uma participação de 1,62% da matriz elétrica com uma adição de 1.651,093 MW de potência por energia solar.

Nesse sentido, questões como os já mencionados incentivos políticos e econômicos, o apelo das conferências internacionais sobre desenvolvimento sustentável com a criação de metas nacionais para redução do impacto ambiental e a regulamentação da geração distribuída abrem caminho para uma disseminação de sistemas de energia solar fotovoltaica.

### 2.3 Micro e minigeração distribuída

O uso de geração distribuída com fontes alternativas de energia elétrica vem crescendo no mundo e também no Brasil. Nesse contexto, observa-se que a energia solar fotovoltaica e a eólica são as que apresentam o maior potencial para utilização na geração distribuída de eletricidade. Os sistemas de geração distribuída que utilizam energia solar são bastante adequados para a instalação em qualquer local onde haja boa incidência de luz (Villalva, 2015).

Define-se a geração distribuída a partir do uso de geradores descentralizados, instalados próximos aos locais de consumo. Já a micro e a minigeração caracterizam-se como pequenas centrais de geração que utilizam fontes renováveis ou cogeração qualificada para produzir energia elétrica. Tais centrais são ligadas à rede por meio de instalações das próprias unidades consumidoras.

Segundo a Resolução Normativa nº 482/2012 da Aneel, de 17 de abril de 2012, que estabeleceu as regras para a micro e a minigeração distribuídas – e sua versão vigente e revisada com maiores informações sobre fatura, a REN nº 687/2015 – passou a ser permitido ao consumidor brasileiro usar fontes renováveis ou cogeração qualificada para gerar energia elétrica e abastecer o próprio consumo, podendo produzir créditos de energia nos momentos em que a quantidade gerada é maior do que a consumida. Para isso, a 482/2012 regulou também o fornecimento do excedente da energia gerada por este consumidor de volta à rede de distribuição a partir de um sistema de créditos para compensação de energia denominado *net metering*.

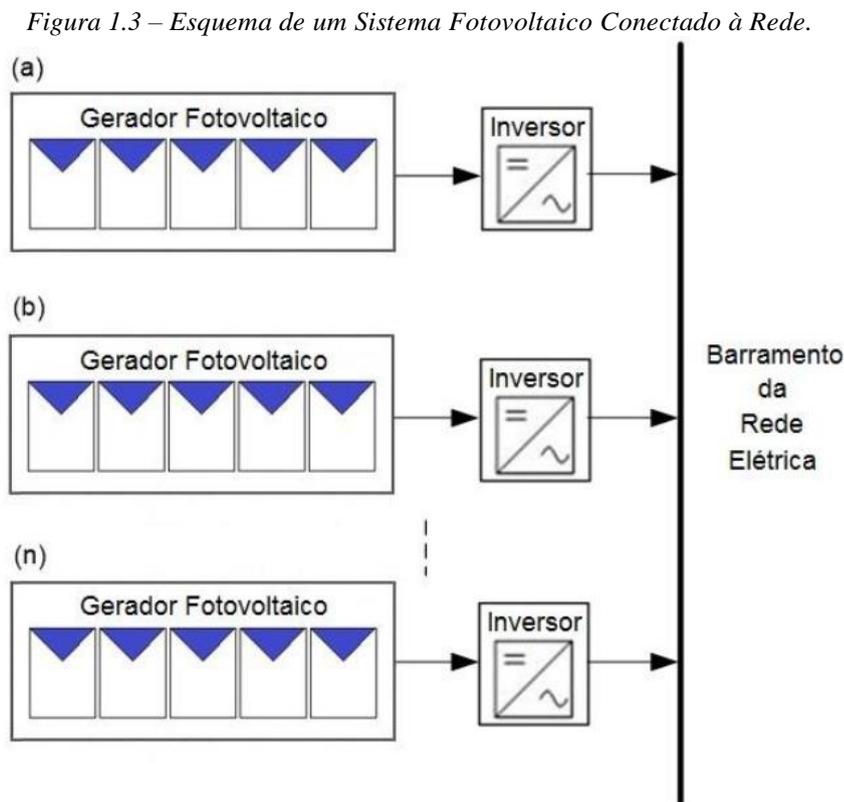
Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes (Aneel, 2016).

O uso em larga escala de sistemas com geração distribuída apresenta diversos benefícios para a sociedade e para o sistema elétrico brasileiro. Os mais diretos consistem na diversificação da matriz energética, melhoria no nível de tensão na rede, redução da demanda por investimentos em linhas de transmissão, distribuição com menos carregamento das redes e menos perdas, adiamento de construção de usinas baseadas em fontes convencionais de energia, além de produzir menor impacto ambiental na sua implementação e em seu funcionamento. Dessa forma, as inovações trazidas por esse tipo de sistema, especialmente na

forma de micro e minigeração de energia elétrica, têm apelo na medida em que permitem integrar sustentabilidade, economia de recursos e consciência socioambiental.

## 2.4 Sistema fotovoltaico conectado à rede

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) podem ser divididos em duas categorias principais: sistemas isolados (SFI) e sistemas conectados à rede (SFCR). Nos primeiros há a necessidade de algum tipo de armazenamento, que normalmente é feito por baterias, para possibilitar fornecimento de energia nos períodos em que não há geração fotovoltaica. Já os sistemas conectados à rede são aqueles em que a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica, dispensando o uso de equipamentos de armazenamento. Nesse caso é a própria rede que funciona como uma grande bateria na medida em que armazena a energia excedente quando a produção do sistema supera o consumo. A Figura 2.3 mostra o esquema de um SFCR.



*Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014*

Os sistemas conectados à rede devem operar obrigatoriamente em corrente alternada (c.a.) e na mesma frequência e tensão da rede local. Outra característica importante é que um

SFCR fica inoperante quando não há tensão na rede, mesmo se houver irradiação solar presente, para não ocorrer situação de ilhamento<sup>1</sup>. Para sua implementação, é necessário que a rede local seja capaz de receber a energia elétrica gerada e deve-se ter em mente que a qualidade da energia da rede pode comprometer a transferência de energia do sistema (CRESESB, 2014).

Dentro da categoria de SFCR, dependendo da magnitude e da capacidade de geração de energia, os sistemas ainda podem ser classificados em usinas de geração, mini e microgeração conectados à rede.

Nas usinas de geração fotovoltaica, grandes conjuntos de módulos são conectados a inversores centrais com potência maior que 5 MW. Os inversores são então ligados à transformadores que eleva as tensões do sistema a níveis compatíveis com as linhas de transmissão do sistema elétrico (Villalva, 2015).

Já a mini e a microgeração através de sistemas conectados à rede têm capacidade menor (até 5 MW e até 75 KW, respectivamente) e costumam ser instaladas para suprir total ou parcialmente a demanda elétrica de consumidores residenciais, comerciais ou industriais. Neste caso a ligação normalmente é feita em baixa tensão com um conjunto de módulos fotovoltaicos, inversor cc-ca, quadros elétricos e medidores de energia (Villalva, 2015).

## **2.5 Geração de energia solar e componentes de SFCR**

Na geração de energia a partir do Sol, alguns aspectos e componentes têm especial relevância. O primeiro que se pode mencionar é o próprio Sol como recurso, com avaliação das suas características e do seu comportamento, tanto de forma geral quanto para uma determinada localização geográfica.

Em seguida, o desenvolvimento da tecnologia usada nos sistemas fotovoltaicos, em que a geração de energia e sua consequente utilização somente é possível a partir dos módulos fotovoltaicos e inversores, os principais componentes desses sistemas. A seguir comenta-se cada um dos aspectos e componentes do SFV mais detalhadamente, com foco nas especificidades dos sistemas conectados à rede.

---

<sup>1</sup> Ilhamento é a situação em que uma determinada seção da rede elétrica possui demanda de potência é igual à geração fotovoltaica e um (ou mais) SFCR(s) permanece(m) funcionando e alimentando a carga quando a rede é desenergizada pela distribuidora. É considerada uma situação inaceitável por comprometer a segurança da manutenção da rede. Por isso, os inversores para SFCRs devem ser dotados de proteção anti-ilhamento, o que implica que estes desconectem automaticamente da rede elétrica de distribuição, sempre que esta for desenergizada por motivo de falha ou de manutenção programada da distribuidora (CRESESB, 2014).

### 2.5.1 Recurso solar no Brasil (com destaque para o DF)

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no Planeta, a radiação solar representa fonte energética inesgotável, limpa e com enorme potencial ao ser empregada em sistemas de captação e conversão de energia, como por exemplo, a energia elétrica (CRESESB, 2014).

Aspectos geográficos e climáticos do planeta, seu movimento no espaço e questões geométricas influenciam a forma como a os raios solares incidem e são absorvidos por corpos situados na Terra.

Em cada região do planeta a radiação solar sofre efeitos diferentes ao cruzar a atmosfera. As características da radiação que chega à superfície terrestre dependem da espessura da camada de ar e da composição da atmosfera, que incluir o ar e elementos suspensos como o vapor de água e até mesmo poeira e poluição (Villalva, 2015).

O trajeto dos raios solares até o solo depende das relações geométricas entre eles e Terra, descritas através de vários ângulos, que variam de acordo com o movimento aparente do Sol e a superfície terrestre. Os ângulos da geometria solar são apresentados na Figura 2.4 e definidos a seguir:

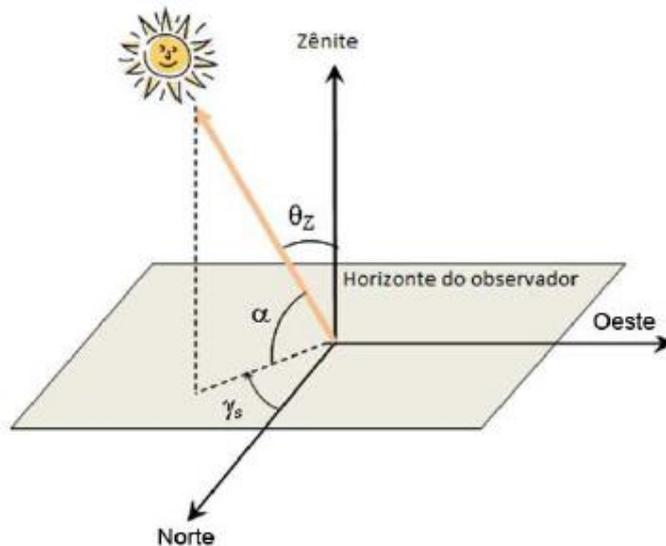
- Ângulo Zenital ( $\theta_z$ ): ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (Zênite<sup>2</sup>).
- Altura ou Elevação Solar ( $\alpha$ ): ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador). Verifica-se que os ângulos mencionados acima são complementares (Figura 2.4 (a)), ou seja: ( $\theta_z + \alpha = 90^\circ$ ).
- Ângulo Azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ): também chamado azimute solar, é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). O deslocamento angular é tomado a partir do Norte ( $0^\circ$ ) geográfico, sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste).
- Ângulo Azimutal da Superfície ( $\gamma$ ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece às mesmas convenções do azimute solar.
- Inclinação da superfície de captação ( $\beta$ ): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal [ $0^\circ$   $90^\circ$ ].

---

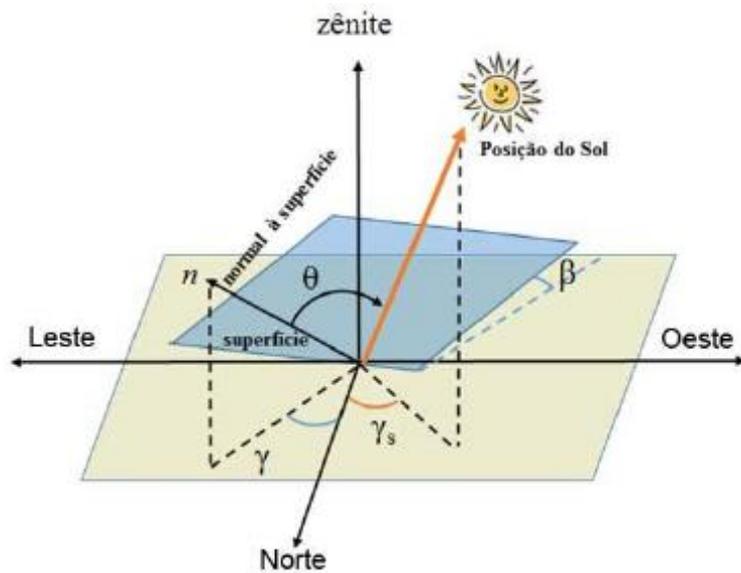
<sup>2</sup> Linha imaginária traçada de forma perpendicular entre o observador e o solo.

- Ângulo de incidência ( $\theta$ ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação (CRESESB, 2014).

Figura 2.4 - Principais ângulos da geometria solar.



(a)



(b)

Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014

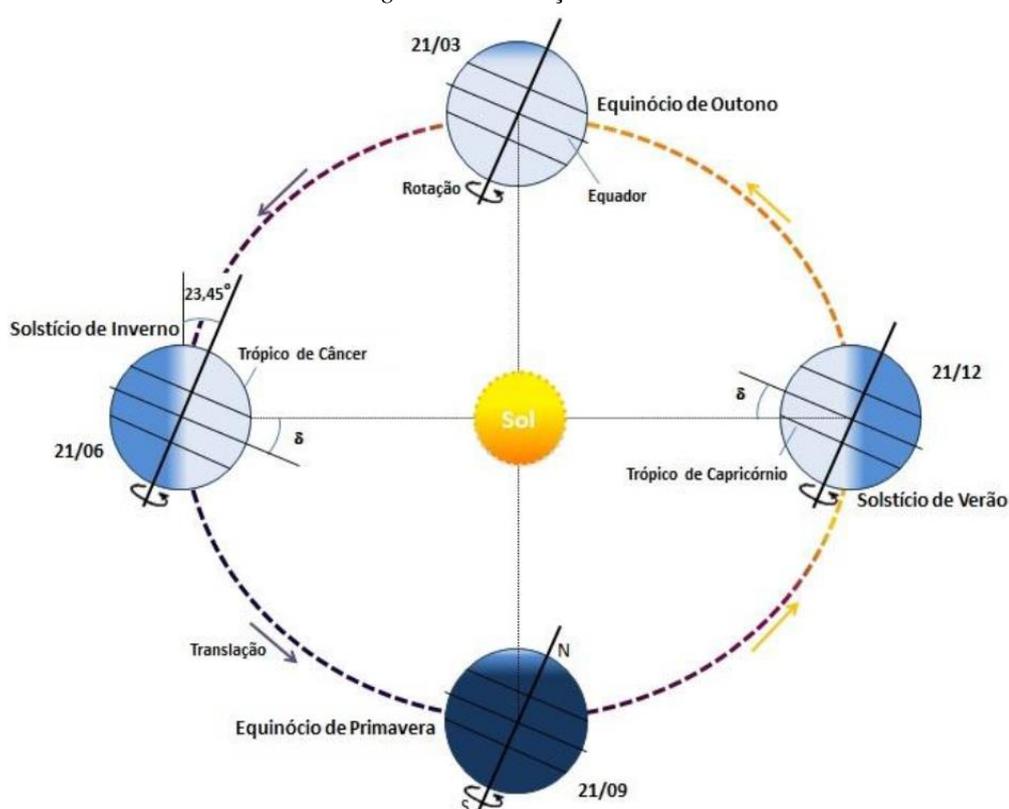
Ainda em relação aos aspectos geométricos entre o Sol e a Terra, faz-se necessário comentar os efeitos dos movimentos realizados pelo planeta e da trajetória que ele descreve.

A Terra, em seu movimento anual em torno do Sol realiza uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade ( $\epsilon \approx 0,017$ ) e o eixo do planeta, em relação ao plano normal à

elipse, apresenta uma inclinação de aproximadamente  $23,45^\circ$ . Essa inclinação, juntamente com o seu movimento de translação, dá origem às estações do ano. Observa-se então que o ângulo entre os raios solares e o plano do da linha do Equador na Terra varia entre  $+23,45^\circ$  em torno do dia 21 de junho (solstício de inverno no hemisfério Sul), e  $-23,45^\circ$  em 21 de dezembro (solstício de verão no hemisfério Sul). Este ângulo, denominado Declinação Solar ( $\delta$ ), é positivo ao Norte e negativo ao Sul do Equador. Nos dias 21 de setembro (equinócio de primavera) e 21 de março (equinócio de outono) os raios solares se alinham com o plano do Equador ( $\delta = 0$ ) (CRESESB, 2014).

A Figura 2.5 ilustra o movimento da Terra em torno do Sol, as estações do ano com as datas referidas ao hemisfério Sul e a Declinação Solar ( $\delta$ ).

Figura 2.5 – Movimento de translação da Terra com destaque para a ocorrência das estações e para o ângulo de declinação solar.



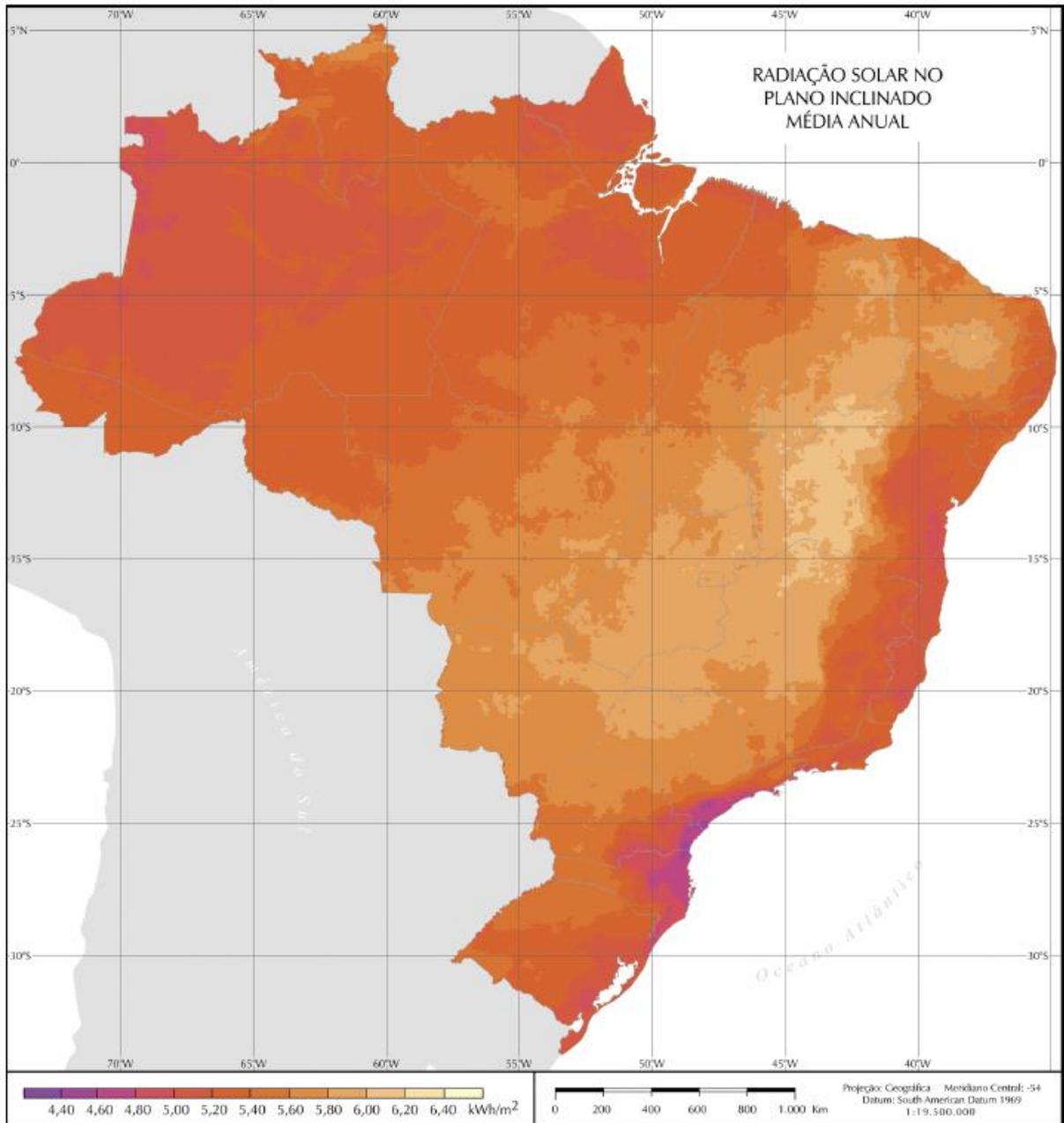
Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPTEL - CRESESB, 2014.

Nos países localizados na zona tropical do planeta, situada entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, os raios solares incidem com ângulos azimutais menores, de forma que ficam sujeitos a massas de ar reduzidas. Por esta razão as zonas tropicais são mais iluminadas e quentes do que as temperadas (Villalva, 2015).

A maior porção do território brasileiro encontra-se justamente na zona tropical (entre o Equador e o Trópico de Capricórnio) e apresenta condições geográficas e climáticas muito favoráveis à geração de energia com fonte solar. Tal avaliação encontra embasamento através de estudos sobre taxas de irradiação de uma determinada localidade.

Dados do (INPE, 2006) mostram que as taxas de irradiação solar no País como um todo são bastante relevantes, com algumas áreas apresentando irradiação média anual de até 6,1 kWh/m<sup>2</sup>. É possível verificar ainda, através dos mesmos dados, que a maior parte do território nacional está concentrada na faixa que vai de 5,2 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 2.6 – Mapa da média anual de Radiação solar no plano inclinado para o território brasileiro.



Fonte: INPE – Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

Apenas para efeito de comparação, um país como a Alemanha, mundialmente reconhecido pela exploração de energia solar, é capaz de alcançar uma irradiação máxima de cerca de 3,5 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que a mínima irradiação no Brasil está por volta de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> e podendo atingir valores de 6,1 kWh/m<sup>2</sup> (Villalva, 2015). Dessa forma, percebe-se que o território brasileiro possui um grande potencial ainda a ser explorado.

O valor da quantidade de energia elétrica que é produzida por um sistema fotovoltaico pode ser obtido considerando os efeitos da variação de irradiância a cada instante. A irradiância é a grandeza que mede a potência radiante ou a radiação solar que incide no plano da Terra por

unidade de área (expressa em  $W/m^2$ ). Sabe-se que a potência, por sua vez, representa a energia transportada por intervalo de tempo ou, em outras palavras, a variação de energia no tempo.

Assim, valores maiores de potência da radiação solar significam mais energia transferida durante um determinado intervalo. Ainda nesse contexto, tem-se o conceito de irradiação (também chamada de insolação e que utiliza como unidade de grandeza o  $Wh/m^2$ ) como a energia incidente por unidade de área ou, alternativamente, o resultado da integração da irradiância por um intervalo de tempo.

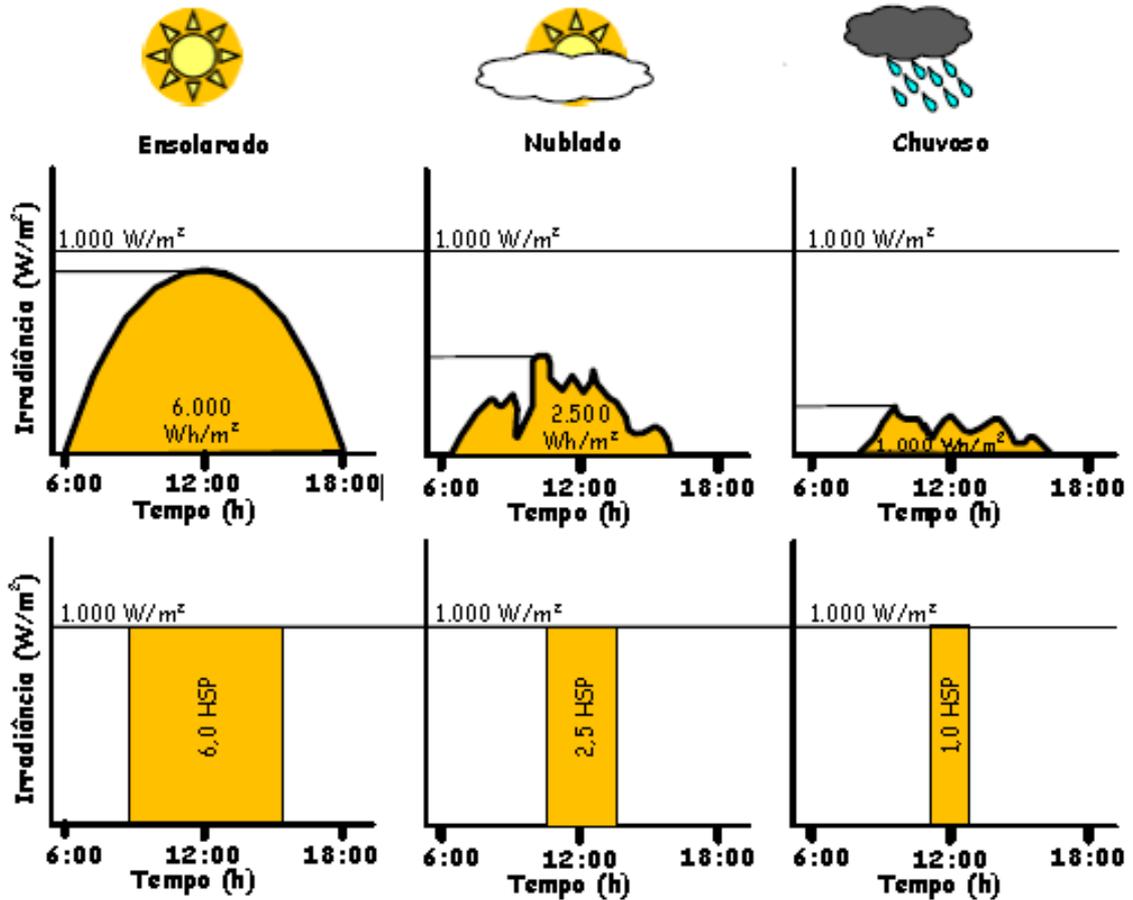
A produção de energia e a irradiação horária relacionam-se de forma linear, o que pode ser traduzido em uma grandeza para representar o valor acumulado de energia em um dia, Horas de Sol Pleno (ou HSP).

Nesse sentido, a ocorrência de estações mostra-se um fator importante para a duração do dia e, conseqüentemente, a quantidade de radiação solar que um local recebe em termos de Horas de Sol Pleno. Tal grandeza relaciona a irradiação disponibilizada pelo Sol e a irradiância quando ela permanece constante em  $1 kW/m^2$ . O resultado é o número de horas em que a energia efetiva sobre o sistema foi igual à energia fornecida pelo Sol no local e ao longo do dia. A seguir observa-se o exemplo do cálculo de HSP para uma localidade com taxa de irradiação de  $5 kWh/m^2$ .

$$HSP = \frac{5 [kWh/m^2]}{1 [kW/m^2]} = 5 [h/dia]$$

Observando Figura 2.7 a seguir é possível compreender melhor a grandeza HSP pois ela apresenta três perfis diferentes de radiação solar em um dia com seus valores de horas de sol pleno correspondentes. A figura também ilustra os efeitos que as condições climáticas têm sobre os resultados.

Figura 2.7 – Perfis de radiação solar diária e seus valores de HSP correspondentes.

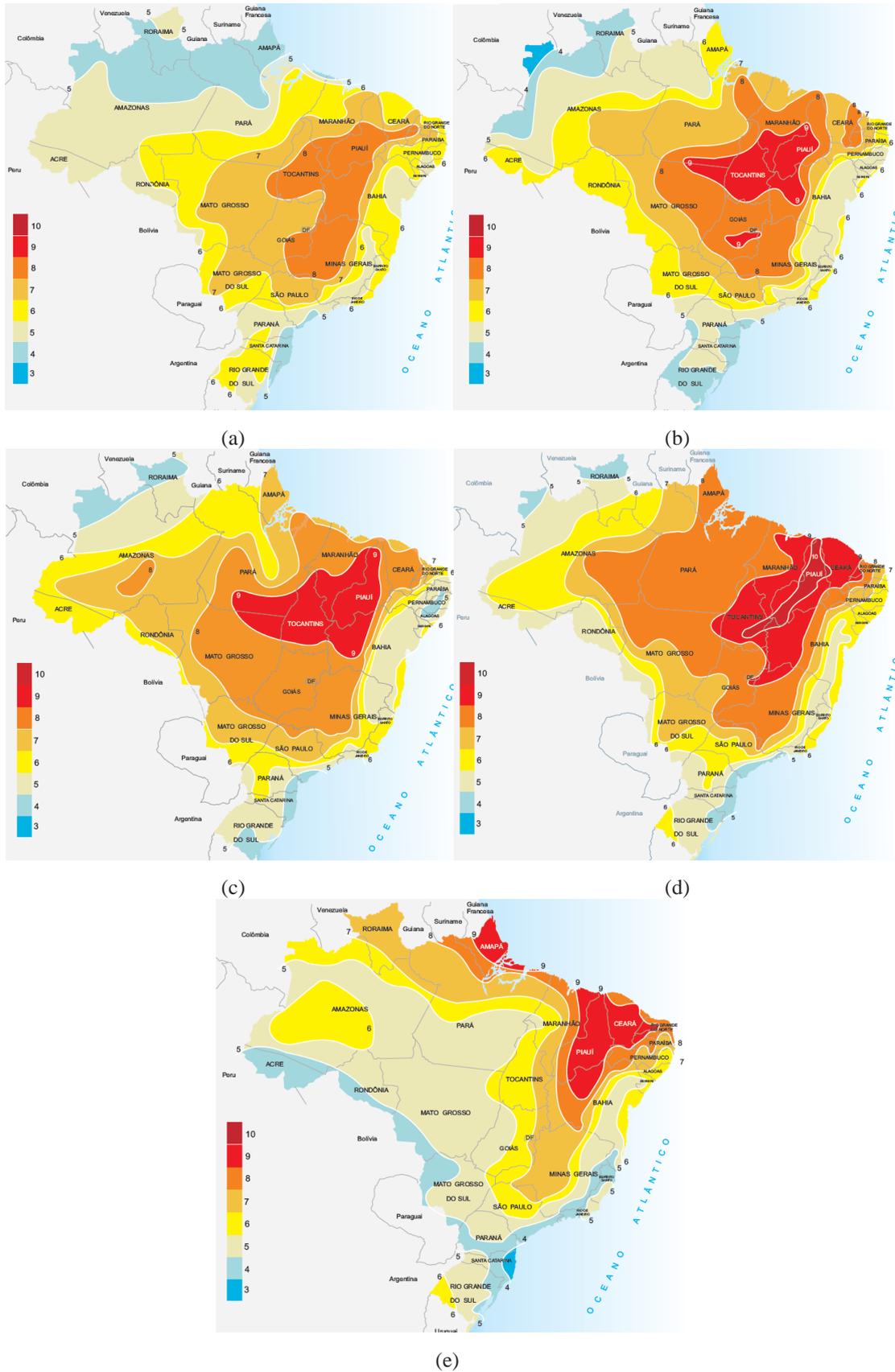


Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014 (PINHO et al., 2008).

A partir dos dados do INPE, observa-se que no Distrito Federal, as taxas de irradiação estão dentro da faixa de 5,8 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup>, na média anual. Isso significa que a unidade da federação tem uma média de 6h/dia de radiação solar, um resultado considerado bastante significativo para geração fotovoltaica.

Outro fator que contribui para os bons índices de irradiação no DF é que seu clima é caracterizado por baixa (ou quase nenhuma) pluviosidade normalmente durante os meses de maio a setembro, sendo que os meses mais secos costumam ser de junho a agosto. O período da seca no DF, apesar de coincidir com o inverno no hemisfério sul, estação com dias de duração mais curta, apresenta um HSP de até 9h/dia (Figura 2.8). Isso ocorre porque essa relação não está sujeita à duração do dia em termos de luz natural (luz solar), mas à radiação que a localidade recebe – o que significaria dizer que a quantidade de irradiação recebida é equivalente a 9h de irradiação de 1kW/m<sup>2</sup>.

Figura 2.8 – Mapa da média anual de Horas de Sol Pleno nos meses de (a) maio, (b) junho, (c) julho, (d) agosto e (e) setembro.



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil – UFPE, 2000. Acesso em 19/10/2017.

A análise do recurso solar no Brasil, com foco no Distrito Federal e na cidade de Brasília, para fins de implementação de um projeto de energia solar fotovoltaica mostra que a localidade é uma das mais propícias para geração de energia a partir da luz solar no País.

### 2.5.2 Materiais e tecnologia fotovoltaica

A energia proveniente do Sol é transmitida à Terra através do espaço na forma de radiação eletromagnética. As ondas desse tipo de radiação, ao incidirem sobre determinados materiais, podem, além de transmitir calor, produzir alterações nas propriedades elétricas ou originar tensões e correntes (Villalva, 2015).

Atualmente existem diversas tecnologias aplicadas na fabricação de células e módulos fotovoltaicos, sendo que as mais comuns são a de silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que juntas representam mais de 85% do mercado. Isso é explicado pelo fato de tais tecnologias serem consideradas consolidadas e confiáveis, e por possuírem a melhor eficiência comercialmente disponível (CRESESB, 2014).

Há também a tecnologia que utiliza filmes finos de silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), e telureto de cádmio (CdTe). Os filmes finos surgiram mais recentemente, quando as tecnologias cristalinas já estavam bem desenvolvidas e, apesar de terem menor custo de produção, também apresentam menor eficiência na conversão de energia solar incidente em energia elétrica.

Finalmente, ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e produção em pequena escala, tem-se a tecnologia das células fotovoltaicas multijunção, das células fotovoltaicas para concentração (CPV – *Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*). Cabe comentar que a tecnologia CPV apresentou um grande potencial para produção de módulos com altas eficiências, embora o seu custo ainda não seja capaz de competir com o das tecnologias que atualmente dominam o mercado (CRESESB, 2014).

Tabela 2.2 – Percentuais de eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%

Fonte: Fraunhofer ISE, Universidade de Stuttgart, 26th IEEE PVSC, NREL, UNSW, folhas de dados de fabricantes. (Adaptado de Villalva, 2015).

### 2.5.3 Módulos

A célula fotovoltaica é a unidade básica do gerador fotovoltaico e sozinha produz uma quantidade pequena de eletricidade. Do agrupamento de várias células conectadas eletricamente surgem os módulos solares (também conhecidos como painéis ou placas).

Na fabricação dos módulos, as células fotovoltaicas são associadas eletricamente e encapsuladas. Um módulo pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo, de forma a obter os parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados para a aplicação a que o módulo está destinado.

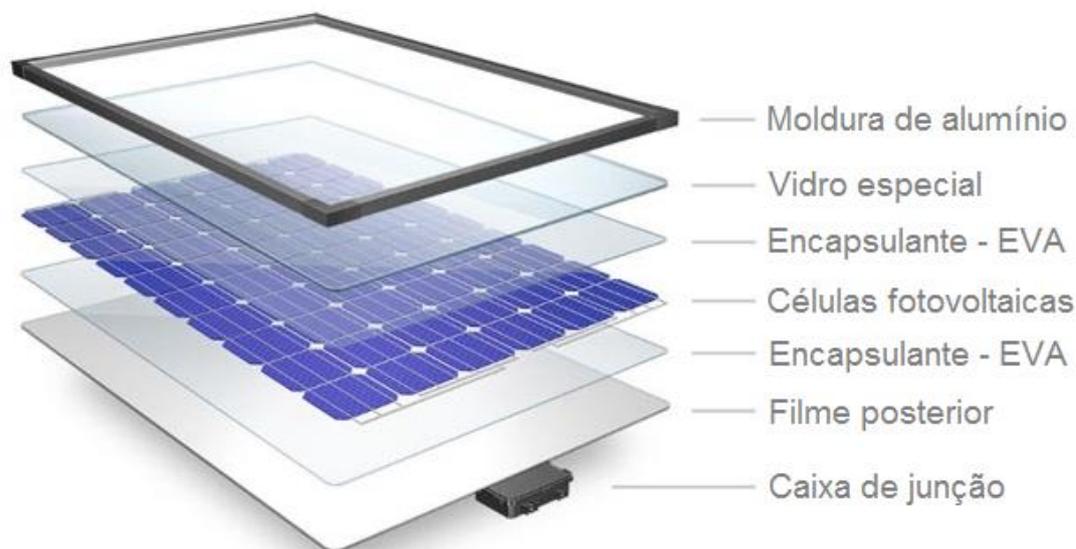
A associação das células é feita em tiras, geralmente com soldagem realizada por iluminação com lâmpadas halógenas ou radiação laser. Depois de soldadas, as células são encapsuladas, a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico (CRESESB, 2014).

O encapsulamento é feito em camadas com vidro temperado de alta transparência, acetato de etil vinila (EVA, do inglês Ethylene-vinyl acetate) estabilizado para a radiação ultravioleta, células fotovoltaicas, EVA estabilizado, e um filme posterior isolante produzido com uma combinação de polímeros.

O processo de laminação é realizado a temperaturas de 120 °C a 150 °C, quando o EVA se torna líquido e as eventuais bolhas de ar geradas são eliminadas. No processo seguinte, é realizada a cura do EVA, que proporciona uma maior durabilidade ao módulo fotovoltaico. Na finalização do módulo, coloca-se uma moldura de alumínio e a caixa de conexões elétricas (CRESESB, 2014).

A Figura 2.9 mostra um esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.

Figura 2.9 – Composição de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.



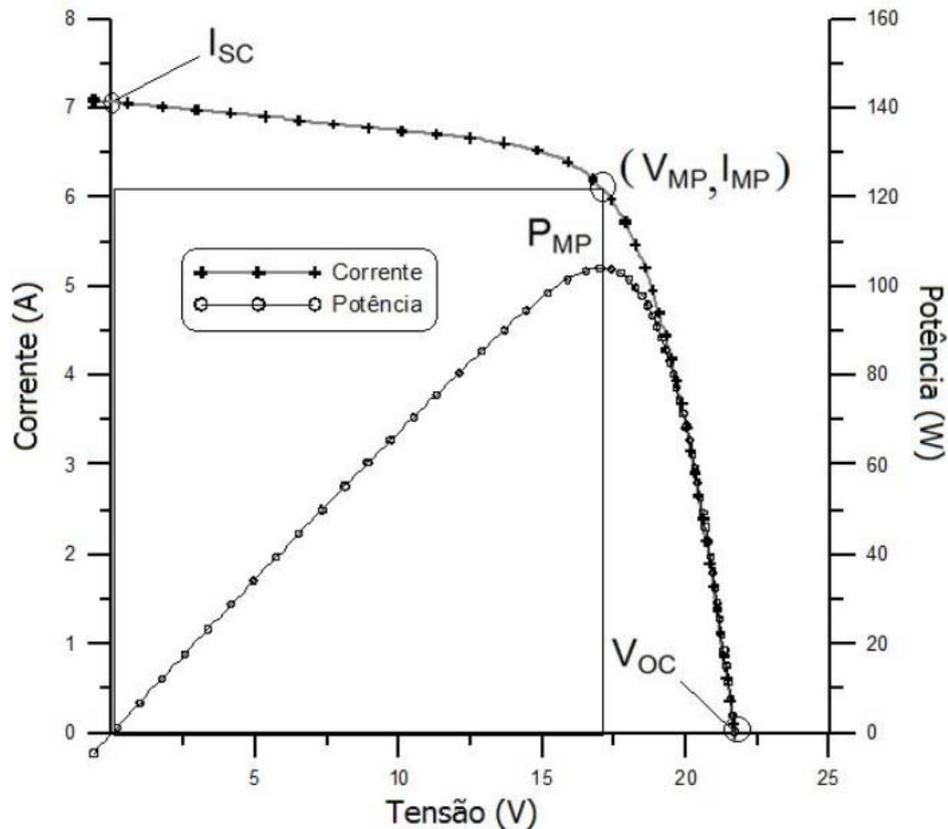
Fonte: Portal solar. Disponível em: [www.portalsolar.com.br](http://www.portalsolar.com.br). Acesso em 20/10/2017

A quantidade de corrente elétrica que uma célula é capaz de produzir está diretamente relacionada à sua área que, por sua vez, limita a quantidade de luz do sol captada. A tensão na saída do módulo fotovoltaico não é constante pois depende da corrente e vive versa. A partir da curva I-V característica de um módulo é possível determinar o ponto de operação em que a potência gerada é máxima. A situação ideal em um sistema fotovoltaico é quando os módulos operam o mais perto possível desse ponto, pois a produção de energia será maior (Villalva, 2015).

Três pontos da curva I-V podem ser destacados: além do ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ) já mencionado, existem os pontos de corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ). A corrente de curto circuito surge quando os terminais do módulo iluminado são curto-circuitados pois, sem tensão, a corrente atinge seu valor máximo. Já a tensão de circuito aberto é medida na saída do módulo quando seus terminais estão abertos, sem nenhuma carga ligada a eles. Assim como no caso da corrente de curto circuito, a tensão de circuito aberto é a máxima tensão que o módulo pode oferecer.

A Figura 2.10 ilustra a curva I-V característica de módulos fotovoltaicos e apresenta os três pontos destacados.

Figura 2.10 – Curva I-V característica de um módulo fotovoltaico.

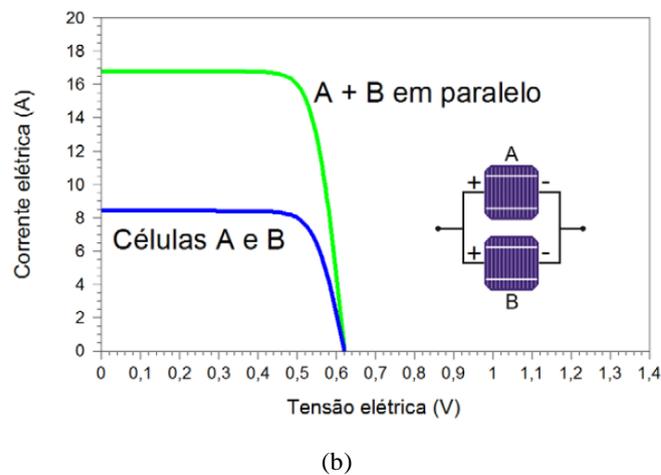
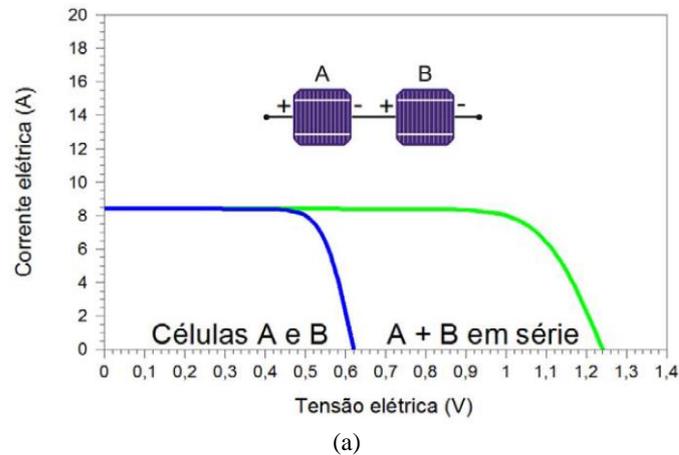


Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014.

No dimensionamento as informações sobre tensão de circuito aberto e corrente de curto são importantes para o dimensionamento, pois o projeto do sistema fotovoltaico deve respeitar as tensões e correntes máximas nas especificações dos inversores, baterias, entre outros equipamentos que são conectados aos módulos (Villalva, 2015).

Ainda sobre a fabricação dos módulos, cabe destacar a associação das células fotovoltaicas em série e em paralelo. No primeiro caso, o terminal positivo de uma célula é conectado ao negativo da anterior formando uma fileira cuja tensão fornecida será o somatório das tensões de cada célula – a corrente permanece a mesma (Figura 2.11(a)). Em seguida, no segundo caso, várias fileiras de células em série são conectadas em paralelo (os terminais positivos das fileiras são ligados em um ponto comum, o mesmo sendo feito para os negativos – Figura 2.11(b)), de forma que sua corrente elétrica seja o somatório das correntes individuais enquanto a tensão permanece constante. Assim é possível obter painéis com áreas maiores, com parâmetros que atendam o dimensionamento dos mais diversos tipos de projeto e com maior capacidade de geração.

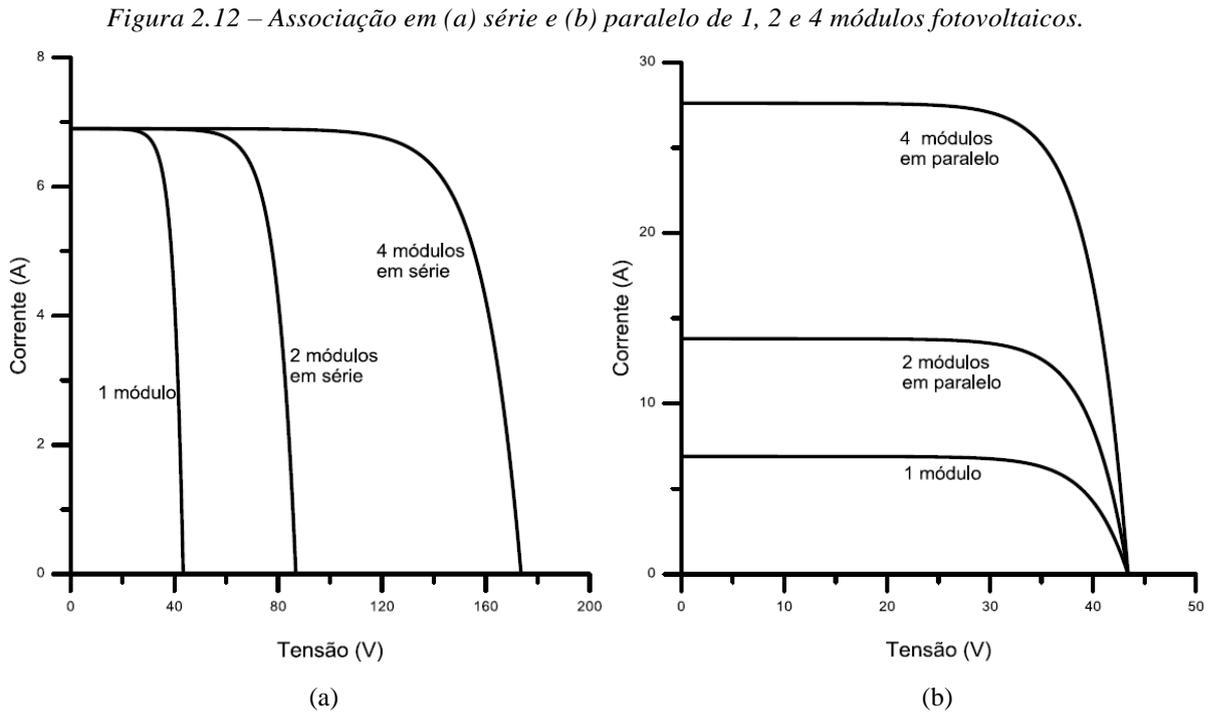
Figura 2.11 – Associação em (a) série e (b) paralelo de células fotovoltaicas.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014.

Da mesma forma, é possível conectar os painéis fotovoltaicos a fim de obter valores maiores de tensão e de corrente. O conjunto de módulos em série é chamado de ‘string’. Várias strings podem ser conectadas em paralelo e, então, ao agrupamento de módulos no sistema fotovoltaico é dado o nome de ‘array’ (ou arranjo, em português).

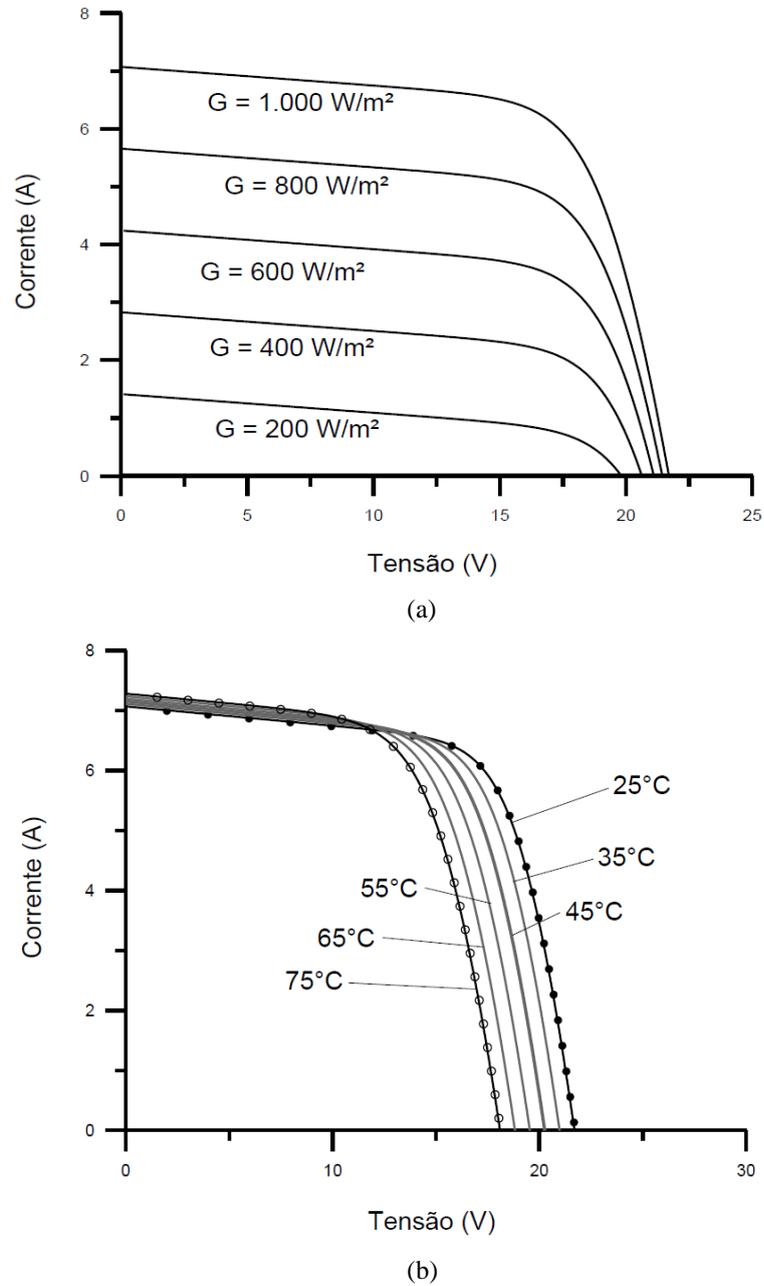
Seguindo a mesma lógica da associação de células, na ligação dos módulos em série, as tensões individuais são somadas, enquanto a corrente é a mesma para todos os painéis na *string*. Já na ligação em paralelo, as tensões dos arranjos são iguais e as correntes é que são somadas. É importante dizer que, em qualquer tipo de ligação, os módulos devem ser iguais (mesmas especificações técnicas e mesmo fabricante), para evitar danos ao sistema. A Figura 2.12 ilustra os efeitos das associações dos módulos fotovoltaicos.



*Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014.*

Normalmente, os painéis fotovoltaicos (e as células de forma individual) podem ter suas características elétricas e sua eficiência influenciadas por dois fatores: a irradiância e a temperatura. O efeito da irradiância é observado com a variação proporcional da corrente do módulo – quanto maior a irradiância, maior a corrente. Alterações na temperatura, por sua vez, evidenciam uma relação inversamente proporcional com a tensão – um aumento de temperatura provoca queda na tensão do módulo. Novamente, a Figura 2.13 a seguir ilustra as duas situações.

Figura 2.13 – Efeitos da (a) irradiância e (b) temperatura sobre a tensão e a corrente nos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014.

#### 2.5.4 Inversores

Inversor é um dispositivo eletrônico que tem a função de fornecer energia elétrica em corrente alternada (c.a.) a partir de uma fonte em corrente contínua (c.c.), que pode ser baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. É necessário que a tensão c.a. de saída tenha amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas e, no

caso de sistemas conectados à rede elétrica, a tensão de saída do inversor precisa ser sincronizada com a tensão da rede (CRESESB, 2014).

Em sistemas isolados os inversores fornecem tensões elétricas alternadas em seus terminais, preferencialmente na forma de onda senoidal pura. Já nos sistemas conectados à rede, os inversores funcionam como fontes de corrente que apenas operam com fornecimento elétrico da rede. Na ausência de fornecimento de energia por parte da concessionária, o inversor desliga-se por duas razões: primeiro porque ele não é projetado para tal e segundo por questões de segurança dos outros equipamentos e das pessoas que os manuseiam ou que fazem manutenção da rede (Villalva, 2015).

No caso de sistemas fotovoltaicos, os inversores podem ser divididos em duas categorias com relação ao tipo de aplicação: SFIs e SFCRs. Embora os inversores para SFCRs compartilhem os mesmos princípios gerais de funcionamento que os inversores para SFIs, eles possuem características específicas para atender às exigências das concessionárias de distribuição em termos de segurança e qualidade da energia injetada na rede (CRESESB, 2014).

O inversor para conexão à rede costuma apresentar um sistema eletrônico de controle que tem a função de fazer com que a corrente nos terminais de saída no inversor (corrente injetada na rede elétrica) tenha o formato senoidal e esteja sincronizada com a tensão senoidal da rede (Villalva, 2015).

A partir das especificações técnicas de um inversor fotovoltaico, podem-se observar algumas características por ele apresentadas e discutidas com mais detalhes a seguir (CRESESB, 2014).

- **Forma de onda e Distorção harmônica:** a forma de onda da tensão c.a. produzida deve ser a senoidal pura. A distorção harmônica total (THD) mede a 'pureza' da tensão fornecida pelo inversor.

- **Eficiência:** trata-se do valor resultante da relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor. Deve-se considerar, no entanto, que variações na potência de entrada e saída, o fator de potência da carga, e outros fatores influem negativamente na eficiência do inversor. A eficiência dos inversores varia, normalmente, na faixa de 50 a 95 %, podendo diminuir quando estão funcionando abaixo da sua potência nominal.

- **Potência nominal de saída:** corresponde à potência que o inversor pode fornecer à carga em regime contínuo. Em SFCRs, a potência do inversor está associada à potência do gerador fotovoltaico utilizado.

- **Taxa de utilização:** é a quantidade de horas em que o inversor fornece energia operando com potência nominal.

- **Tensão de entrada (c.c.):** é o valor de tensão c.c. do inversor. Para inversores de SFGRs, os requisitos relacionados à tensão de entrada do inversor devem ser sempre atendidos pela associação em série/paralelo de módulos.

- **Tensão de saída (c.a.):** é a tensão em c.a. que tem seu valor regulado na maioria dos inversores. Nos inversores para SFGRs, a regulamentação específica que a operação deve ser em BT para potências de até 100kW, enquanto que para potências superiores até 1MW, a injeção deverá ser feita na rede MT de distribuição (13,8kV).

- **Regulação de tensão:** é a variação de amplitude permitida na tensão de saída c.a. Os inversores considerados de melhor desempenho fornecem uma tensão de saída praticamente constante para uma ampla faixa de cargas. As variações na tensão de saída devem estar de acordo com os limites estabelecidos pela Aneel-PRODIST e devem considerar a queda de tensão no circuito de distribuição de energia.

- **Frequência da tensão de saída:** corresponde à frequência da tensão c.a. fornecida pelo inversor. No Brasil a frequência da rede elétrica é 60 Hz, logo os inversores devem fornecer tensão alternada na mesma frequência do sistema elétrico nacional.

- **Fator de potência:** normalmente, em sistemas residenciais, as cargas são indutivas com um fator de potência de até 0,5. Os inversores podem ser projetados para compensarem as cargas indutivas e manterem o fator de potência próximo de 1, o que maximiza a transferência de potência para a carga.

- **Consumo de potência sem carga (consumo permanente, autoconsumo, consumo em standby):** é a potência utilizada pelo inversor quando nenhuma carga está sendo alimentada. Para reduzir o autoconsumo, alguns inversores monitoram continuamente a sua saída, detectando se alguma carga está sendo usada e passam a operar efetivamente apenas a partir do momento em que uma carga é detectada.

- **Temperatura e umidade do ambiente:** a temperatura ambiente máxima do local onde o inversor irá operar deve ser especificada, pois ela afeta sua eficiência. O ideal é que o local de instalação apresente uma ventilação adequada. Além disso, também pode ser necessário garantir a umidade relativa do ambiente dentro da especificação de operação do inversor.

- **Proteções:** Inversores comerciais costumam apresentar alguns mecanismos de proteção contra os principais problemas de funcionamento do sistema elétrico:

o **Sobretensão na entrada c.c.:** um inversor pode ser danificado se o nível de tensão de entrada (c.c.) for excedido (é importante para SFIs pois sensores podem desconectar as baterias se os limites de tensão especificados forem excedidos).

- Inversão de polaridade na entrada c.c.: evita a queima do aparelho caso ocorra uma inversão acidental da polaridade.
- Curto circuito na saída c.a.: os terminais de saída do inversor podem ser colocados em curto sem que o equipamento sofra danos.
- Sobrecargas e elevação de temperatura: controles capazes de desligar a unidade, para impedir danos, são importantes se as cargas conectadas ao inversor excederem sua capacidade ou se a temperatura de operação do inversor exceder o seu limite. É recomendável que a proteção seja eletrônica e que tente reenergizar o sistema algumas vezes antes de desligar o inversor definitivamente para evitar que o sistema fique desligado devido a problemas transitórios.

## 2.6 Árvores Solares Fotovoltaicas

Árvores solares são sistemas de geração fotovoltaica, isolados ou conectados à rede, que apresentam um *design* diferenciado, com o intuito de imitar o *design* de uma árvore: postes normalmente altos, com painéis dispostos de forma que, além de funcionar como gerador fotovoltaico, fazem o papel de “copa”. Normalmente são sistemas menores, que se enquadram em microgeração devido à sua capacidade.

O principal objetivo por trás da construção de árvores solares fotovoltaicas é dar visibilidade ao uso de energia solar, além de desenvolver cada vez mais a tecnologia e as formas de integração de sistemas de geração fotovoltaica à paisagem urbana.

Com a proposta de um *design* em formato de árvore, os sistemas, além de serem mais facilmente integrados à área urbana, podem utilizar uma área menor se comparados com instalações tradicionais (em telhados ou fachadas de prédios) de mesma capacidade de geração.

A geração fotovoltaica através de árvores solares não é algo tão recente. Um projeto pioneiro foi instalado na cidade de Gleisdorf na Áustria em 1998, uma época em que a energia solar não era minimamente viável e a tecnologia era menos desenvolvida. Ainda assim, a árvore instalada na Áustria é um sistema de grandes proporções: tem cerca de 17,3 metros de altura, possui um conjunto de 140 painéis, uma capacidade total de 7 kWp (sendo que ela gera aproximadamente 6650 kWh de energia por ano) e foi elaborada para ser conectada à rede elétrica local de forma a contribuir para a iluminação urbana (PV Upscale, 2007). Na Figura 2.14 é possível ver o modelo dessa árvore solar pioneira.

*Figura 2.14 –: Árvore solar de Gleisdorf, Áustria.*



*Fonte: "Solar City Gleisdorf", Relatório da PV Upscale - Disponível em: <http://www.pvupscale.org/IMG/pdf/Gleisdorf.pdf> - Acesso em 06/11/2017.*

Nos anos seguintes, surgiram outras propostas sobre o tema, novas ideias de *design*, construíram-se protótipos até que as árvores solares se tornaram um produto de mercado. Atualmente, uma maior difusão dessa tecnologia vem trazendo, não apenas uma maior viabilidade para sistemas desse tipo, visibilidade para o uso de energia fotovoltaica e integração arquitetônica, mas também possibilidade de usos que atendem demandas da sociedade moderna. Muitos dos projetos de árvores solares buscam utilidades imediatas para a energia gerada, seja através da instalação de tomadas ou entradas USB para carregar aparelhos eletrônicos móveis, do oferecimento de sinal wi-fi, ou mesmo da iluminação de vias públicas.

A seguir apresentam-se alguns projetos que demonstram o estado da arte em tecnologia de árvores solares no mundo e no Brasil.

### 2.6.1 Projetos similares no Brasil e no mundo

O estado da arte no que diz respeito aos projetos de árvores solares no Brasil e no mundo é composto por modelos com os mais diferentes *designs*, capacidades de geração e tipos de SFV (SFCRs ou SFIs). Apresentam também diversas utilidades para a energia gerada: do carregamento de aparelhos eletrônicos pequenos como celulares até a recarga de veículos elétricos, roteadores wi-fi e iluminação pública, apenas para citar algumas.

Muitos projetos ainda são realizados para fins de estudos acadêmicos e é comum a instalação de protótipos em universidades, como é o caso, por exemplo, de um modelo instalado na Universidade Estadual do Ceará (UECE) no início de 2017.

Segundo o portal da própria UECE, *Árvore Solar*, instalada no campus do Itaperi (Figura 2.15), é formada por dez painéis fotovoltaicos postos na palmeira metálica estilizada sobre “folhas” que são dispostas em diversas alturas e orientações. O projeto serve para carregar as baterias de uma frota de dez bicicletas elétricas usadas pela equipe de segurança local. O sistema ainda é do tipo SFCR e funciona de forma que, durante o dia, quando as bicicletas estiverem conectadas à árvore, os painéis carregarão as baterias. Quando as bicicletas estiverem em uso, a árvore repassará a energia para a rede pública, gerando créditos para a UECE utilizar posteriormente. O carregamento realizado à noite utiliza a energia da concessionária (UECE, 2017).

*Figura 2.15 – Árvore solar da Universidade Estadual do Ceará.*



*Fonte: Foto Divulgação da UECE – Disponível em: [g1.globo.com](http://g1.globo.com) - Acesso em 06/11/2017.*

Outro protótipo de estudo é o modelo instalado em 2016 na Índia, pelo Instituto Central de Pesquisa em Engenharia Mecânica (CSIRs). Neste projeto foi criada uma estrutura que pudesse ser mais indicada para áreas muito populosas, pois o principal objetivo do projeto foi a economia de espaço mantendo a capacidade de geração.

O protótipo instalado, que pode ser visto na Figura 2.16, tem capacidade de geração de 5 kW, estrutura de metal e painéis de orientações diversas, com destaque para os seus ângulos de inclinação.

*Figura 2.16 – Árvore solar do CSIRs instalada na Índia.*



*Fonte: Foto de divulgação – Disponível em: [www.hexapolis.com](http://www.hexapolis.com) – Acesso em: 06/11/2017.*

Árvores solares, no entanto, já vêm sendo comercializadas no mercado como produtos por empresas especializadas. Um dos melhores exemplos disso é o caso da OPTree, modelo desenvolvido por uma empresa de filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV) com sede em Belo Horizonte, a Sunew, e que representa um sistema fotovoltaico na forma de um mobiliário urbano. As “folhas” da árvore são confeccionadas a partir de OPVs dispostos entre peças de vidro e tornam possível a conversão dos raios solares em energia elétrica. O projeto apresenta uma potência instalada de aproximadamente 50 Wp para carregar aparelhos eletrônicos e um roteador wi-fi. A árvore ainda possui ainda baterias sob seu banco, o que permite o funcionamento mesmo durante os períodos em que não há geração solar.

Cada árvore apresenta uma estrutura feita em aço inox, base em eucalipto e dimensões de 3,88 metros de diâmetro, por 3,88 metros de altura, segundo divulgação da própria empresa. Além disso, é comercializada em módulos que facilitam a montagem e instalação. Recomenda-se seu uso em locais abertos como praças, parques e jardins de museus, para a maior captação da irradiação solar. Cabe mencionar ainda que o produto da Sunew é vendida no mercado por um preço aproximado de R\$ 15 mil.

O modelo foi adquirido e instalado pela empresa de engenharia MRV, também com sede na capital mineira, como parte de suas propostas de fomentar o uso de energia solar, como mostra a Figura 2.17(a) a seguir. A árvore da Sunew também possui uma unidade instalada na área externa do Museu do Amanhã na cidade do Rio de Janeiro (Figura 2.17 (b)).

*Figura 2.17 – Árvore solar da Sunew (a) na sede da empresa MRV e (b) na área externa do Museu do Amanhã.*



(a)



(b)

Fonte: Foto de divulgação da Sunew– Disponível em: (a) [mrv.com.br](http://mrv.com.br) e (b) [exame.com](http://exame.com) – Acesso em: 06/11/2017.

A partir dos exemplos citados, verifica-se as propostas de projetos dentro do tema de árvores solares e as possibilidades de desenvolvimento de tecnologia e ideias de *design* que ainda podem surgir. Os projetos existentes podem diferir ou se assemelhar através de aspectos como a capacidade de geração, a utilização da energia gerada, a tecnologia empregada, o arranjo, o dimensionamento, na possibilidade de comercialização, entre outros. Isso só corrobora o fato de que o estudo e a realização de projeto de árvores solares se mostram cada vez mais ricos e ainda devem encontrar muito campo para crescimento.

## 2.7 Considerações finais do capítulo

Conforme mencionado anteriormente, o propósito deste capítulo era trazer conceitos necessários para orientar a compreensão do restante do trabalho e apresentar uma contextualização sobre a sua temática. Nesse sentido, buscou-se abordar, de forma detalhada, questões sobre as energias renováveis na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, o histórico da instalação de SFVs no Brasil com seus incentivos, os sistemas conectados à rede, o recurso solar, a tecnologia fotovoltaica e componentes como módulos e inversores. Além disso, apresentou-se também o “estado da arte” do tema do trabalho, com uma seção específica sobre as árvores solares.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta em detalhes a metodologia e os materiais adotados para avaliar os aspectos do projeto e da implementação da árvore solar fotovoltaica na Faculdade de Tecnologia, assim como a eficiência e o desempenho do sistema.

Propuseram-se dois casos principais para a avaliação do projeto. No primeiro, será verificada a eficiência da árvore solar considerando-se um primeiro modelo arquitetônico (modelo teórico) em que os “galhos” da árvore encontram-se todos em um mesmo plano os seus painéis fotovoltaicos têm a mesma orientação. O método também deve definir qual orientação é a mais eficiente para esse modelo e a sua capacidade de geração. Já no segundo caso, será apresentado o modelo do arranjo final da árvore solar após sua construção, montagem e instalação na Faculdade de Tecnologia e uma simulação computacional da energia gerada por ele.

Finalmente, os dois casos de estudo poderão ser comparados de um ponto de vista técnico e econômico, enquanto que os resultados poderão ser levados em consideração para futuras replicações do projeto da árvore solar.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Com o intuito de auxiliar na realização das análises propostas neste trabalho, algumas ferramentas computacionais foram de fundamental importância. A seguir, comenta-se sobre cada uma delas juntamente com as suas funcionalidades.

##### 3.1.1 SketchUp

O SketchUp é uma ferramenta computacional de modelagem 3D para projetos de arquitetura, *design* e engenharia que necessitem do desenho de uma estrutura ou peça de forma detalhada e que possibilite visualização de diferentes ângulos. Atualmente a licença de uso do programa pertence à Google e ele conta com recursos comuns a outros programas da empresa como, por exemplo, a função de georreferenciamento do modelo 3D a partir de dados do Google Earth Pro, que será mencionada em maiores detalhes mais à frente.

No caso específico deste trabalho, o SketchUp possibilitou a criação de um modelo da estrutura da árvore solar durante a etapa da sua concepção e, posteriormente, a análise do local onde ela seria instalada. Para isso, foi realizado um estudo de sombreamento no jardim interno

da Faculdade de Tecnologia, local previsto para a instalação. Com o georreferenciamento do modelo e com o auxílio da ferramenta *Shadows* do SketchUp, é possível visualizar a projeção de sombras em um determinado lugar para qualquer horário e dia do ano.

### 3.1.2 PVSyst

Para a avaliação computacional do sistema da árvore solar, foi usado o PVSyst, uma ferramenta computacional que permite estudar, dimensionar e analisar dados de sistemas fotovoltaicos. Dentre suas funcionalidades, o PVSyst possui uma ampla base de dados de equipamentos (modelos de módulos e de inversores) e das condições meteorológicas de várias localidades no mundo. O *software* pode ser utilizado para realização de qualquer tipo de projeto de sistema fotovoltaico: conectado à rede, isolado, de bombeamento de água, etc. Ele possui ainda níveis de *design* do projeto que correspondem aos diferentes estágios de desenvolvimento de um projeto real de um SFV. Para um sistema conectado à rede, como é o caso da árvore solar neste trabalho, com o ‘*design* preliminar’ (ferramenta *preliminary design* no programa) obtém-se uma estimativa para algumas características e alguns parâmetros gerais do projeto. Trata-se de uma etapa mais voltada ao estudo de viabilidade do sistema, relacionando dados sobre a sua arquitetura (área disponível), a potência desejada e os investimentos financeiros necessários.

Com a ferramenta ‘*design* de projeto’, por sua vez, é possível simular mais detalhadamente e com parâmetros obtidos de hora em hora todo o funcionamento do sistema. Nessa etapa, determinam-se aspectos específicos do projeto como a orientação dos módulos, o modelo de painel e de inversor, além do arranjo do gerador fotovoltaico. Para um mesmo projeto, o PVSyst também permite criar diferentes variantes (*variants*) e mudar alguns aspectos do *design*. Dessa forma, pode-se fazer diversas simulações e buscar o arranjo otimizado do sistema.

Como uma segunda etapa do dimensionamento do projeto, especifica-se, caso necessário, parâmetros mais detalhados como as perdas térmicas e ôhmicas, a qualidade do módulo, *mismatch*, perdas por efeito do ângulo de incidência e resistência dos fios. Para todos esses parâmetros, contudo, o PVSyst apresenta valores *default* que, mesmo que não sejam exatamente os valores reais, representam o sistema em questão de forma bastante coerente.

Os resultados obtidos com o PVSyst apresentam valores simulados para cada mês, dia ou hora de diversas variáveis como a irradiação global, a energia na saída do inversor, energia injetada na rede, corrente e tensão do arranjo, perdas e eficiência do sistema, apenas para citar

algumas. Finalmente, gera-se um relatório para cada simulação realizada que inclui todos os parâmetros usados no projeto e todos os resultados mais relevantes.

### 3.1.3 AutoCAD

O AutoCAD é um programa de *design* auxiliado por computador (*Computer Aided Design* - CAD) e um produto da empresa Autodesk, Inc. Assim como o SketchUp, trata-se de uma ferramenta utilizada para criar desenhos e modelos em duas ou três dimensões. O AutoCAD, contudo, costuma ser mais adotado na realização de desenhos técnicos em projetos de arquitetura e engenharia, para fazer plantas ou projetos elétricos, por exemplo.

Para o projeto da Árvore Solar Fotovoltaica, o AutoCAD foi o programa usado na elaboração do diagrama unifilar da instalação elétrica dos seus componentes (módulos, inversor, dispositivos de proteção e cabos de conexão entre os equipamentos e com a rede).

### 3.1.4 Excel®

Para analisar os dados obtidos com as simulações do PVSyst, foi utilizado o MicroSoft Excel®, ferramenta de edição de planilhas do pacote Office da Microsoft. Com auxílio das suas funções e a partir dos resultados exportados do PVSyst em formato ‘.csv’, foi possível organizar os valores obtidos em forma de tabelas e gráficos para posterior análise.

O Excel®, através de suas funções de cálculos algébricos, também viabilizou um estudo de alocação de cargas na árvore solar através de uma tabela que calculasse o consumo energético de alguns aparelhos eletrônicos e comparasse com a energia gerada pelo sistema. Finalmente, a ferramenta também foi usada para avaliar a viabilidade econômica do projeto e o cálculo do custo da energia gerada por ele.

## 3.2 MÉTODO UTILIZADO

Na definição do método a ser aplicado na realização deste trabalho, deve-se considerar que ele pode ser resumido em três etapas: a primeira referente a uma avaliação preliminar do projeto com base em um trabalho acadêmico anterior para familiarização com o tema, a segunda referente à análise técnica do projeto para sua implementação – comparando dois modelos arquitetônicos, o teórico (sugerido no trabalho anterior) e o do arranjo final (tal como foi construído e instalado) – e para avaliar seu desempenho e, finalmente, a terceira etapa, referente

à avaliação econômica da árvore solar a partir da definição do custo da energia por ela produzida e verificação da viabilidade do projeto. A metodologia seguida para cada uma das etapas será descrita mais detalhadamente a seguir.

### **3.2.1 Avaliação preliminar do projeto**

O presente trabalho trata da implementação do projeto de uma Árvore Solar Fotovoltaica e da avaliação de seu desempenho e eficiência. Para que isso fosse possível, houve uma etapa anterior de dimensionamento e análise econômica para definição dos modelos de equipamentos que poderiam ser comprados para realização do projeto. Tal etapa foi elaborada por um trabalho acadêmico que antecedeu este Trabalho de Conclusão de Curso, o trabalho “Especificação Técnica para implementação de Árvore Solar na Faculdade de Tecnologia” (Barbosa, 2014). Este último foi estudado e tomado como base para algumas das ações executadas na implementação do SFV em questão.

O primeiro passo na metodologia adotada para este trabalho foi fazer uma avaliação do projeto inicial da árvore para entender quais foram os aspectos observados à época durante o dimensionamento do sistema. As considerações deste projeto preliminar serviram de base para a construção da estrutura da árvore e a aquisição pela Universidade de Brasília de todos os equipamentos que compõem o SFV. Foi necessário, portanto, tomá-lo como referência e dar prosseguimento a estudos para validar o modelo e torná-lo viável.

### **3.2.2 Metodologia da análise técnica**

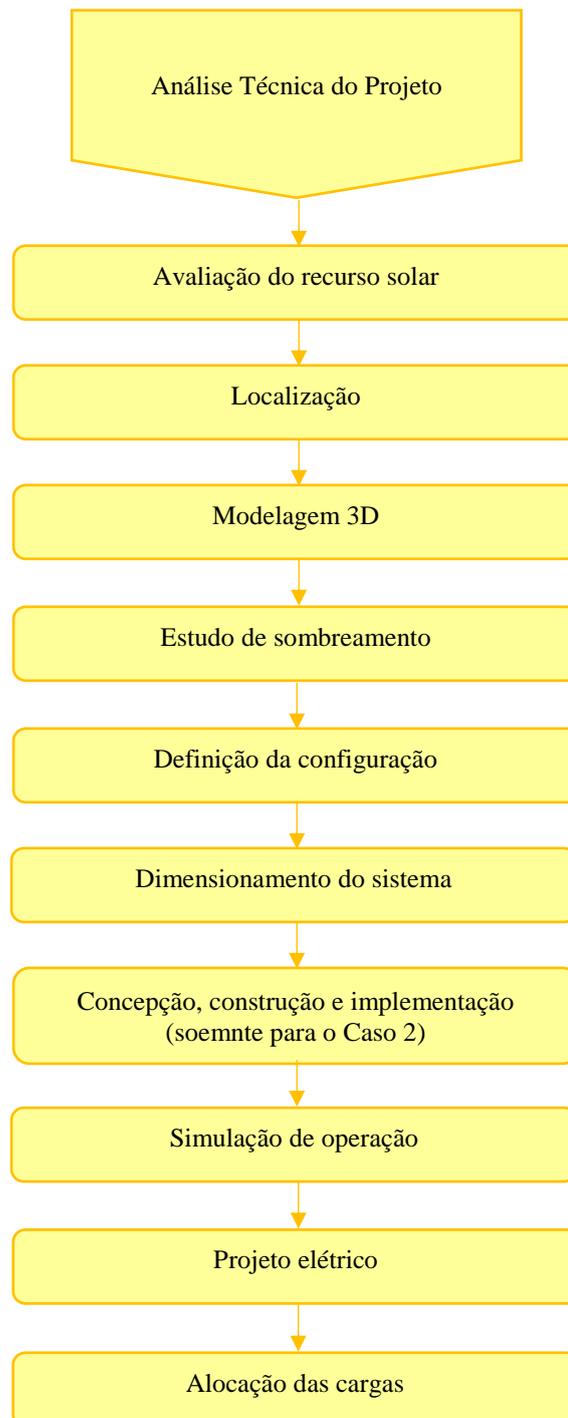
A metodologia da análise técnica foi empregada para os dois casos em estudo a fim de comparar seus resultados.

O caso 1 corresponde ao modelo arquitetônico teórico elaborado para o pré-projeto da árvore solar. Trata-se de uma estrutura de seis “galhos”, todos sem curvaturas, em um mesmo plano horizontal e cada um com quatro painéis de mesma orientação. A princípio o caso 1 é um modelo mais eficiente, o que poderá ser avaliado com os resultados técnicos

O caso 2, por outro lado, considera o modelo do arranjo final da árvore, a sua estrutura tal qual foi construída e montada. Esse arranjo apresenta algumas diferenças práticas em relação ao modelo teórico do caso 1: a estrutura manteve a mesma quantidade de painéis e “galhos”, mas os primeiros possuem orientações (inclinação e azimute) distintas e os últimos têm uma curvatura que faz com que os painéis não estejam todos no mesmo plano.

Com o intuito de estudar o desempenho de um SFV na forma de uma árvore solar e comparar os modelos de projeto (casos 1 e 2), foi adotado um método de análise técnica composto pelas etapas apresentadas no fluxograma da Figura 3.1 a seguir.

*Figura 3.1 - Fluxograma para análise técnica do projeto.*



### 3.2.2.1 Avaliação do recurso solar

Para um melhor funcionamento do gerador fotovoltaico é importante buscar conhecer os valores de radiação solar global incidente sobre o arranjo e avaliar fatores como a influência da irradiância e a temperatura nos módulos. Sabe-se que dentre tais fatores, alterações na irradiância é o que mais causa efeitos no SFV pois pode variar de forma significativa em pequenos intervalos de tempo, como por exemplo, durante a passagem de uma nuvem.

O valor da quantidade de energia elétrica que é produzida pelo sistema em questão pode ser obtido considerando os efeitos da variação de irradiância a cada instante. A produção de energia e a irradiação horária relacionam-se de forma linear, o que pode ser traduzido em uma grandeza para representar o valor acumulado de energia em um dia, HSP ou Horas de Sol Pleno. Tal grandeza relaciona a irradiação disponibilizada pelo Sol e a irradiância permanece constante em  $1 \text{ kW/m}^2$ . O resultado é o número de horas em que a energia efetiva sobre o sistema foi igual à energia fornecida pelo Sol no local e ao longo do dia.

Neste trabalho avaliou-se o recurso solar através dos dados meteorológicos e solarimétricos adquiridos através da modelagem computacional do sistema. Com auxílio do *software* PVSyst, que conta com uma ampla base de dados para diversas localidades no mundo, foi possível selecionar os dados para a cidade de Brasília fornecidos pela ferramenta Meteonorm 7.1. Esta, por sua vez reúne informações de estações meteorológicas e satélites geostacionários, aplica modelos de interpolação e apresenta resultados bastante relevantes para aplicações em energia solar. Assim, o dimensionamento do SFV no PVSyst possibilitou a obtenção de dados de irradiação solar no local de instalação da árvore e a elaboração de gráficos que serão comparados às curvas de carga e de energia gerada pelo sistema.

### 3.2.2.2 Localização

Na análise técnica do projeto é fundamental decidir o local onde os painéis fotovoltaicos serão instalados, pois este fator influencia bastante o desempenho do sistema. Há que se considerar questões como a possibilidade de objetos ou prédios nas proximidades do SFV projetarem sombras sobre ele e a integração arquitetônica do projeto com o local de instalação.

Em função das variações do recurso solar de um local para outro e influência de objetos e prédios vizinhos, com o conseqüente sombreamento do gerador fotovoltaico, é importante fazer uso de programas que permitam a análise da incidência da radiação solar sobre o plano

considerado. Esses programas são especialmente úteis para sistemas instalados em ambiente urbano e/ou que ocupam áreas extensas (CRESESB, 2014).

A análise feita com o PVSyst na etapa anterior de avaliação do recurso solar e o posterior estudo de sombreamento com o SketchUp foram muito importantes nesse sentido.

Ainda quanto a localização do gerador, no caso deste trabalho, para o posicionamento dos painéis em si não houve muita limitação em termos de superfície disponível pois eles seriam fixados à própria estrutura da árvore que, por sua vez, apresentava uma grande liberdade de posicionamento. Os aspectos mais relevantes para a escolha do local de instalação da árvore solar foram, basicamente, o sombreamento, as dimensões da estrutura como um todo, proximidade com o quadro elétrico, a segurança e a visibilidade do projeto.

### **3.2.2.3 Modelagem 3D**

Nesta etapa, foram usados modelos tridimensionais do protótipo da árvore e da Faculdade de Tecnologia (FT) criados no *software* SketchUp para uma avaliação ainda mais detalhada do local de instalação escolhido.

Com os modelos em escala, foi possível posicionar a árvore no jardim interno da FT, verificar se a área designada possuía as dimensões adequadas para a implementação do projeto e determinar a distância que deveria ser respeitada em relação às construções próximas.

### **3.2.2.4 Estudo de sombreamento**

Ainda a partir dos modelos em 3D da árvore e da FT, foi realizado um estudo de como as sombras são projetadas sobre os módulos instalados no protótipo. Para isso, o primeiro passo é georreferenciar o modelo do local inserindo as suas coordenadas geográficas no SketchUp. Isso permite observar o movimento do Sol ao longo de um dia na localidade determinada e, conseqüentemente as sombras que geradas por ele. Basta utilizar a ferramenta ‘Shadows’, que permite definir o dia e o horário para o qual se deseja verificar a posição das sombras.

No caso deste estudo, buscou-se determinar o sombreamento das construções e objetos próximos sobre os painéis no protótipo da árvore solar com foco voltado para as datas do solstício de verão e inverno. Tais datas são bastante representativas pois a primeira corresponde ao dia mais longo do ano e a segunda, ao mais curto. Para esses casos é especialmente importante avaliar a projeção e a duração das sombras sobre o modelo.

### 3.2.2.5 Definição da configuração

De forma geral, define-se o arranjo dos elementos do sistema a partir das características da carga e da disponibilidade de recursos energéticos (CRESESB, 2014). Novamente os casos em questão apresentam especificidades pois o sistema não foi projetado com o intuito de suprir uma determinada demanda de energia para uma carga. Avaliou-se então apenas a associação entre os painéis de forma a otimizar a geração e considerando o número de ligações de *strings* e entradas MPPT permitidas pelo modelo de inversor utilizado.

Outras considerações feitas dizem respeito às características de sistemas conectados à rede. É comum para um SFCR ter arranjos com mais de dez módulos em série para operação com tensões mais elevadas. Pode-se também aumentar a potência do sistema associando em paralelo mais de um conjunto de módulos em série.

A definição do arranjo apresentou diferenças para cada um dos casos avaliados. A configuração do sistema no caso 1, auxiliada com dados do PVSyst, é mais simples por considerar os painéis em um mesmo plano horizontal e com orientações iguais, cujos valores de ângulos de inclinação e azimute otimizados também são dados pela ferramenta computacional. Já para o arranjo do caso 2 algumas etapas intermediárias foram necessárias, como considerar o arranjo final existente da árvore solar pós-montagem, estimar os ângulos de orientação dos módulos e a descrição do sistema no PVSyst.

Cabe salientar que todo esse processo de definição da configuração do sistema do caso 2 foi feito não apenas para fins de comparação com o caso 1, mas também no intuito de orientar a instalação das placas solares na árvore para que a geração seja a melhor possível dentro das limitações da estrutura que foi construída.

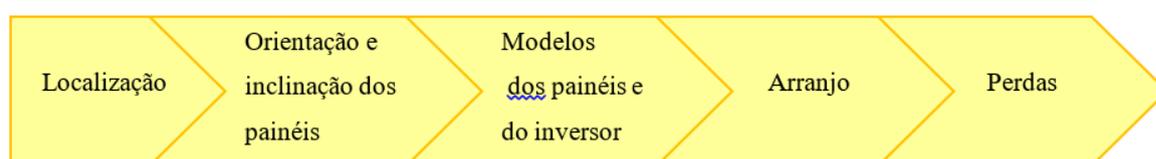
### 3.2.2.6 Dimensionamento do sistema

O dimensionamento do sistema fotovoltaico permite ao projetista escolher os equipamentos mais adequados e configurá-los da forma mais eficiente possível. Ele pode ser feito com o auxílio de *softwares* especializados e, conforme mencionado anteriormente, o presente trabalho utilizou o programa PVSyst. A análise considerou a existência de dois casos de estudo que diferem entre si apenas quanto ao ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos. O primeiro adota uma inclinação única para o ano inteiro e o segundo apresenta inclinações diferentes para os meses de verão e os de inverno.

A modelagem computacional auxilia, inclusive, na comparação entre os valores de energia gerada em cada um dos casos de estudo. Por meio dela, tem-se insumos para avaliar a vantagem de ajustar a inclinação de todos os painéis duas vezes por ano.

Para realizar o dimensionamento e determinar os principais resultados dos casos 1 e 2, devem-se realizar todas as etapas da modelagem do sistema no PVSyst. Definem-se então a localização do projeto, a orientação e inclinação dos módulos, os modelos e potências dos painéis e do inversor, o arranjo e a interligação dos componentes do sistema e os parâmetros de perdas conforme mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Fluxograma das principais etapas do dimensionamento no PVSyst.



Novamente, cabe citar as diferenças entre os casos em estudo. Os casos 1 e 2, apesar de terem a mesma localização e de utilizarem os mesmos componentes (mesmos modelos de painéis e de inversor), possuem orientações diferentes para os painéis, o que, conforme abordado no item anterior, afeta a definição do arranjo.

Ainda conforme mencionado anteriormente, pode ser necessário especificar no dimensionamento parâmetros de perdas (como as perdas térmicas e ôhmicas, a qualidade do módulo, *mismatch*, perdas por efeito do ângulo de incidência e resistência dos fios) ou então realizar a simulação do sistema utilizando os valores *default* apresentados pelo PVSyst para esses parâmetros.

### 3.2.2.7 Concepção, construção e implementação da árvore solar na FT

Nesta seção será descrito com detalhes as etapas realizadas para viabilizar a instalação do projeto da árvore solar da FT. As etapas compreenderam principalmente a concepção e desenho do modelo arquitetônico, a aquisição por parte da universidade dos equipamentos necessários, construção da estrutura de metal, obras para preparação do local e a montagem de fato do protótipo.

### 3.2.2.8 Simulação de operação

Com a definição do arranjo e a escolha dos equipamentos, pode-se realizar a simulação da operação do sistema, o que permite ao projetista avaliar o efeito de variações sazonais do recurso solar, por exemplo. A simulação é feita após o dimensionamento e com o auxílio de *softwares* especializados.

Nesses programas é possível obter uma modelagem bastante realista do projeto, já que eles costumam dispor de recursos para determinar a inclinação e a orientação dos módulos e para descrever a configuração e os equipamentos escolhidos, a partir de um banco de dados com modelos de painéis e inversores de diversos fabricantes. A simulação da operação do sistema pode ainda ser obtida para intervalos de tempo que vão de horas até meses.

Assim, as diferenças observadas nos parâmetros simulados no PVSyst, principalmente no que diz respeito à capacidade de geração de cada um dos casos, permitem determinar qual modelo apresenta maior eficiência.

### 3.2.2.9 Projeto elétrico

Uma vez que se tem o modelo dimensionado, com a definição das quantidades e do arranjo dos equipamentos, é necessário fazer o projeto elétrico do sistema para orientar a sua instalação. Nele, além de representar os componentes do SFV e como eles estão dispostos, deve-se dimensionar os cabos condutores e o sistema de proteção de forma que a interconexão das partes do sistema seja eficiente para minimizar perdas de energia e para que o projeto atenda aos requisitos de segurança. Para isso, adota-se a ABNT NBR 5410:2004, a norma brasileira para instalações elétricas de baixa tensão.

No dimensionamento dos cabos condutores, a norma recomenda a utilização dos métodos de capacidade de corrente e queda de tensão. O cálculo da seção transversal deve ser feito seguindo os dois critérios e o maior valor encontrado será adotado.

Os condutores devem ser dimensionados de acordo com os critérios de capacidade de corrente, queda de tensão e método de instalação. Os dispositivos de proteção, como disjuntores termomagnéticos e interruptores diferenciais residuais, presentes obrigatoriamente nas instalações elétricas em baixa tensão, são especificados e dimensionados também de acordo com as normas vigentes (Villalva, 2015).

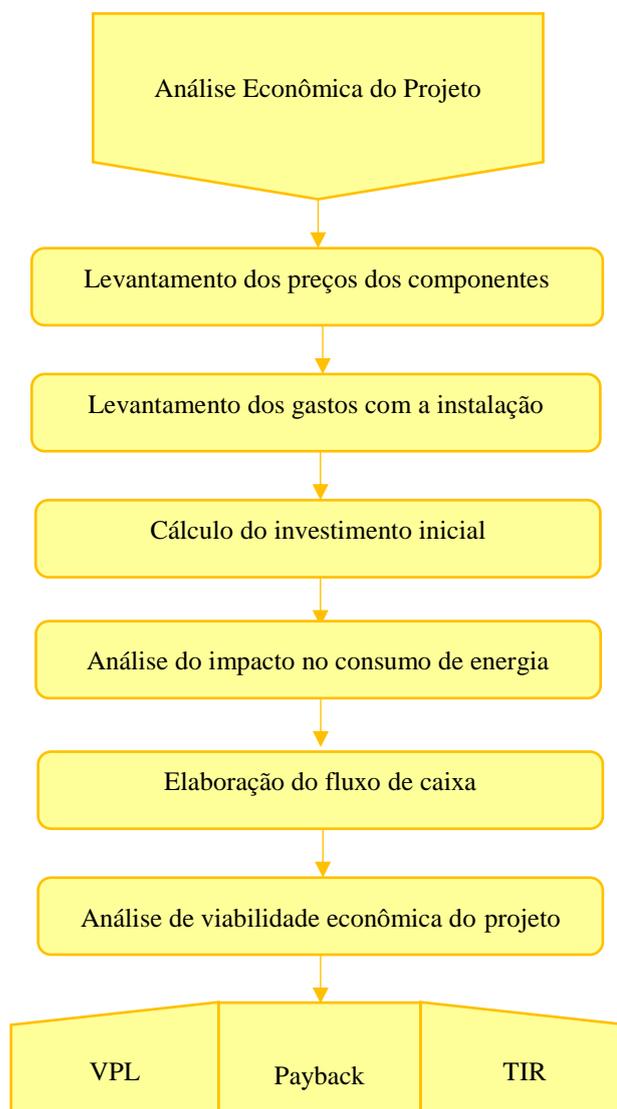
### **3.2.2.10 Alocação de Cargas**

Finalmente, para oferecer uma perspectiva da quantidade de carga que o SFV da árvore solar da FT é capaz de suprir, será feito um levantamento do consumo de energia de aparelhos e sistemas que necessitem da energia fornecida pela rede à qual o protótipo deverá ser conectado. Devem ser considerados aspectos tais como os tipos de aparelhos normalmente utilizados no local, as características do consumo e o fato de a árvore não ter sido projetada com baterias que realizem o armazenamento de energia para períodos sem geração.

### **3.2.3 Metodologia da análise econômica**

A metodologia adotada para a análise econômica da árvore solar foi elaborada de forma a registrar os recursos nela empregados e, eventualmente, servir de base para os gastos em projetos futuros que sejam semelhantes a este. Foram realizadas as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 3.3 e os resultados servem para ambos os casos avaliados

Figura 3.3 - Fluxograma da análise econômica do projeto.



### 3.2.3.1 Levantamento dos preços dos componentes do SFV

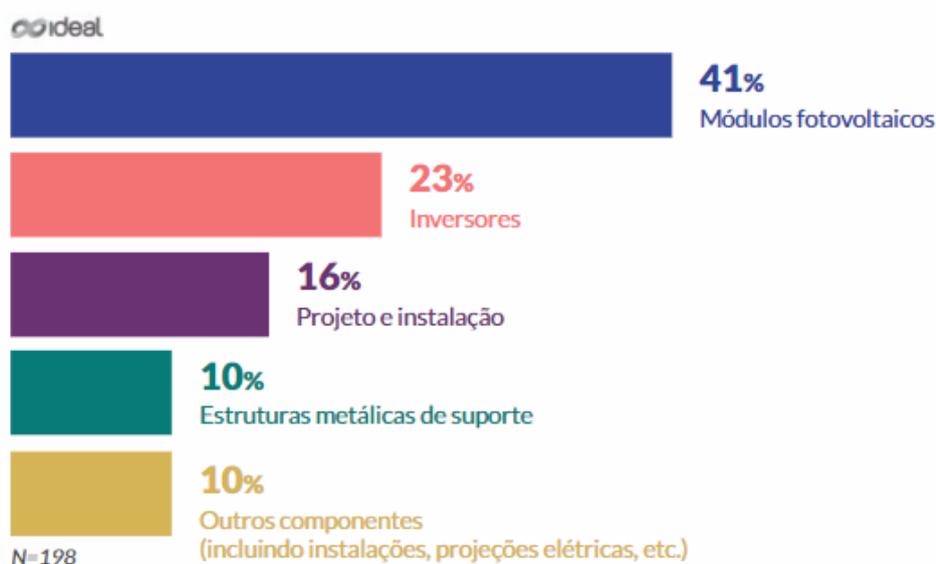
O investimento com um sistema fotovoltaico é determinado, basicamente, pelo seu tamanho, traduzido no valor de sua potência instalada. O primeiro passo da análise econômica é calcular os custos com os componentes do SFV. Além do peso que as principais partes (módulos, inversores e baterias, quando for o caso) têm no custo total, deve-se considerar também o gasto com o Balanço do Sistema (BOS).

Ainda na etapa na etapa de avaliação do pré-projeto da árvore solar, feito em um trabalho acadêmico anterior a este, verificou-se a realização de uma pesquisa de mercado entre diversos modelos e fabricantes, além de revendedores de componentes. Naquela ocasião, determinou-se

a utilização de um modelo de painel e de inversor que tivessem um bom preço e atendessem aos requisitos pretendidos no projeto.

Segundo dados de um levantamento do Instituto Ideal, observa-se que atualmente os gastos com os módulos representam a maior parcela do custo total de um SFV, seguidos pelo gasto com o inversor, que também é bastante relevante. O restante do investimento com o projeto é relativo aos componentes necessários para a instalação como cabos, conectores, estruturas metálicas de suporte para fixação das placas e proteções elétricas. A Figura 3.4 a seguir apresenta a composição do custo total de um sistema fotovoltaico.

Figura 3.4 – Composição do custo total de um SFV.



Fonte: O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica, Edição 2017 – Instituto Ideal. Disponível em [https://issuu.com/idealeco\\_logicas/docs/estudoidealmercadofv2017\\_web](https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/estudoidealmercadofv2017_web) - Acesso em 20/10/2017

### 3.2.3.2 Levantamento dos gastos com a instalação

O projeto de um sistema FV na forma de uma árvore solar apresenta algumas peculiaridades em relação a projetos ‘tradicionais’ de SFVRs, com a instalação isso também fica evidente. Neste projeto foi necessário considerar gastos com alvenaria na construção de um local mais apropriado para a instalação da árvore. Dessa forma, houve um custo adicional ao do sistema FV referente a material e trabalho dos técnicos nas etapas de preparação da base e de concretagem do piso.

O custo final da instalação foi então estimado com o somatório dos recursos empregados na aquisição de material (tijolos, cimento, areia, brita e armação de ferro) e na mão de obra (quantidade de técnicos e dias trabalhados). Esses últimos foram calculados a partir de tabelas

de precificação das atividades de pedreiro e eletricista que prestam serviços para a Universidade de Brasília.

### **3.2.3.3 Cálculo do investimento inicial**

O cálculo do investimento inicial do projeto foi realizado considerando principalmente os gastos com a aquisição dos componentes e com a instalação do sistema. Cabe ressaltar que os mesmos custos se aplicam aos dois casos em estudo.

Cabe avaliar, a partir dos custos calculados com para o investimento no projeto, a viabilidade da árvore solar em termos do custo final da energia por ela produzida.

### **3.2.3.4 Análise do impacto econômico do SFV no consumo energético**

Nesta etapa, deve-se determinar um meio de utilizar os dados obtidos nas simulações de operação para analisar o impacto da economia com geração dos SFVs no consumo energético da FT. O primeiro passo é obter dados do consumo e das tarifas de energia às quais a UnB está submetida. Em seguida, com os valores de geração do arranjo em cada um dos casos, verifica-se quanto é possível economizar na conta de energia com a parte do consumo que será suprida pela árvore solar

### **3.2.3.5 Elaboração do fluxo de caixa**

O fluxo de caixa atua como uma ferramenta de controle das movimentações financeiras durante um período de tempo estabelecido. É usado para registrar entradas e saídas de recursos e para projetar gastos dentro do período analisado.

Sua elaboração requer informações sobre o tempo de vida do projeto, o valor da tarifa local de energia elétrica e seu aumento percentual, a taxa de inflação, taxa de juros e valor residual. Há que se considerar ainda os gastos com a manutenção do sistema que incluem a limpeza dos painéis e, eventualmente, a substituição de componentes como cabos, conectores, disjuntores, entre outros.

Além disso, deve-se acrescentar à análise a despesa com a troca do inversor, já que sua vida útil corresponde aproximadamente à metade da duração do gerador fotovoltaico. Em números, um inversor costuma apresentar uma vida útil de 10 a 15 anos, enquanto os módulos fotovoltaicos podem durar cerca de 25 anos com eficiência acima de 80%.

### 3.2.3.6 Análise de viabilidade econômica do projeto

Na avaliação da viabilidade econômica do projeto foram empregados três dos principais indicadores de análise financeira: o valor de “payback”, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Para o cálculo desses indicadores, é necessário avaliar também a chamada Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que representa o retorno mínimo esperado com a implementação do projeto. Os indicadores e os métodos utilizados para obtê-los encontram-se melhor descritos a seguir.

#### 3.2.3.6.1 Valor de *Payback*

O *payback* de um projeto é um indicador de recuperação dos recursos investidos. Em outras palavras, seu valor representa o tempo necessário para que um projeto gere os recursos financeiros que paguem o investimento. Dessa forma, quanto menor o *payback*, mais rápido o projeto começa a produzir lucros.

Existem dois métodos para o cálculo desse indicador: o *payback* simples e o descontado. O primeiro considera apenas o investimento inicial e as receitas que o projeto gera. Já o segundo utiliza o valor do TMA para descontar os fluxos de caixa antes de proceder com a soma deles.

#### 3.2.3.6.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido pode ser definido como a diferença entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos. No seu cálculo, todos os fluxos de caixa são descontados a uma TMA até a data do investimento e, dessa forma, tem-se uma mesma data de referência e os valores presentes das entradas e saídas.

Um resultado positivo para esse indicador significa que o projeto é economicamente viável e pode vir a gerar lucros. Um valor nulo de VPL representa a situação em que o projeto se paga ao longo da sua vida útil, mas não gera receitas positivas. Já um valor negativo significa que o projeto não se paga e gera apenas prejuízo. Assim, é desejável obter o maior VPL possível para maior viabilidade econômica.

### 3.2.3.6.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Esse último indicador representa a rentabilidade do projeto de forma percentual. A Taxa Interna de Retorno segue a periodicidade dos fluxos de caixa, sendo uma medida relacionada ao tempo presente. Uma observação importante é que o valor da TIR, ao substituir a TMA na determinação do VPL, faz com que este último seja igual a zero.

O cálculo da TIR deve ser feito de forma iterativa e seu resultado deve ser comparado à TMA. As conclusões de tal comparação podem então ser usadas na avaliação da viabilidade econômica do projeto em questão. De forma simplificada, há três situações possíveis resultantes da comparação entre os valores da TIR e da TMA:

- $TIR > TMA$ : esse caso normalmente significa que o projeto é capaz de cobrir o investimento feito e ainda gerar lucro (ou, no caso da árvore solar, que gere uma economia com a conta de energia capaz de ultrapassar o valor gasto no projeto);
- $IR = TMA$ : nessa situação, o projeto gera uma receita que cobre apenas os gastos necessários para implementá-lo, sem que haja lucro;
- $TIR < TMA$ : significa que a implementação do projeto gera prejuízo.

É necessário, contudo, tomar alguns cuidados com a adoção do valor da TIR na análise econômica, uma vez que seu cálculo pode levar a mais de um resultado ou a nenhum, o que prejudica as conclusões sobre a viabilidade do projeto. Por isso é recomendável usar a TIR de forma combinada com os outros indicadores já mencionados. Além disso, pode-se adotar a TIR modificada, que corresponde à TIR com os fluxos de caixa negativos trazidos para o valor presente e os positivos para o valor futuro, resultando em um novo fluxo de caixa convencional e eliminando possíveis erros da TIR tradicional.

## 3.3 Considerações finais do capítulo

As explicações do presente capítulo serviram para apresentar os materiais e métodos empregados na avaliação dos aspectos de projeto e da implementação da árvore solar fotovoltaica na Faculdade de Tecnologia, assim como a eficiência e o desempenho do sistema.

Primeiramente, apresentaram-se as ferramentas computacionais que foram utilizadas ao longo do trabalho, bem como as suas funcionalidades e de que forma elas seriam empregadas.

Em seguida, abordou-se o método empregado. De acordo com o que foi explicado, uma das propostas do estudo foi a comparação de dois casos que apresentavam modelos arquitetônicos com diferenças em relação às orientações dos painéis. A metodologia adotada,

no entanto, considerou três etapas: a primeira referente a uma pré-execução do projeto com base em um trabalho acadêmico anterior, a segunda referente à análise técnica do projeto para sua implementação e, a terceira, à avaliação econômica da árvore solar a partir da definição do custo da energia por ela produzida. Além disso, comentou-se sobre inclusão de uma avaliação do desempenho do sistema. No caso 1, deverá ser verificado o desempenho da árvore solar considerando-se o modelo teórico, enquanto o caso 2 representa o modelo real de projeto tal como será implementado. Nesse sentido, o método também deve permitir definir qual orientação é a mais eficiente para cada modelo e as suas capacidades de geração.

A análise técnica do projeto de um sistema fotovoltaico na forma de uma árvore solar tal como foi apresentada neste capítulo mencionou e descreveu etapas tais como: a avaliação do recurso solar, a localização do projeto, a modelagem tridimensional, o estudo de sombreamento, a definição do arranjo, o dimensionamento do sistema, a simulação de operação e o projeto elétrico.

Por fim, quanto à metodologia adotada para a análise econômica da árvore solar, explicou-se que ela deveria servir para registrar os recursos empregados no projeto e, eventualmente, servir de base para os gastos em projetos futuros que sejam semelhantes a este. Foi comentado em maiores detalhes as etapas de levantamento dos preços dos componentes e gastos com a instalação, avaliação do investimento inicial e do impacto econômico do SFV no consumo energético.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos ao longo da implementação do projeto da Árvore Solar da FT, bem como os resultados da aplicação das metodologias de análise técnica e econômica.

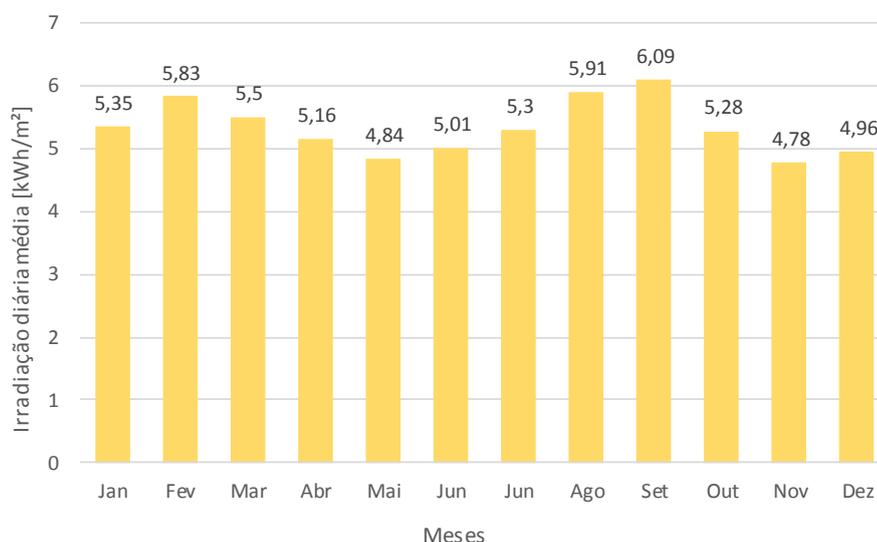
### 4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE TÉCNICA

#### 4.1.1 Avaliação do Recurso Solar

Conforme comentado anteriormente, a avaliação do recurso solar foi feita através de informações disponíveis no *software* PVSyst. Como o PVSyst já possui um vasto banco de dados meteorológicos e solarimétricos para diversas cidades do mundo, sendo que tais dados são obtidos por ferramentas da NASA e da Meteotest (como o Meteonorm 7.1), bastou selecionar a cidade de Brasília para o programa poder efetuar os cálculos e análises do local em que a árvore solar foi instalada. Sabe-se, no entanto, que apesar de não se ter os dados mais precisos para as coordenadas geográficas exatas do ponto de instalação da árvore na FT, foi possível considerar que os dados gerais para a cidade de Brasília são suficientes e representam de forma fiel a localização do sistema.

Dessa forma, foi possível obter os valores da média diária de irradiação solar para cada mês do ano na cidade de Brasília. Tais valores são apresentados no Gráfico 4.1 a seguir.

Gráfico 4.1 – Valores médios da irradiação solar diária para cada mês na cidade de Brasília.



Fonte: Dados do software PVSyst obtidos com auxílio da ferramenta Meteonorm 7.1

Da avaliação dos resultados no gráfico, percebe-se que a cidade de Brasília realmente apresenta taxas de irradiação bastante relevantes. Dentre todos os meses, tem-se uma média total de aproximadamente 5,33 kWh/m<sup>2</sup>, com desvio padrão igual a 0,43. Um desvio tão pequeno demonstra que, de fato, a maioria das médias diárias para cada mês apresentam valores bem próximos da média total.

Dados anteriormente apresentados mostram que o Brasil possui taxas de irradiação que vão de 4,5 a 6,1 kWh/m<sup>2</sup> (INPE, 2006). Relacionando os resultados obtidos pelo PVSyst para Brasília com os do resto do País, é possível ver que o valor de 5,33 kWh/m<sup>2</sup> é próximo ao da média do Brasil (de 5,3 kWh/m<sup>2</sup>) e que o valor máximo, verificado no mês de setembro, é muito próximo do máximo total do País.

A análise do recurso solar na cidade de Brasília comprova que a localização do projeto da árvore solar é bastante adequada para se atingir bons resultados na geração fotovoltaica.

#### **4.1.2 Localização**

No estudo “Especificação Técnica para Implementação de Árvore Solar na Faculdade de Tecnologia”, que antecedeu este trabalho, também foi feita uma avaliação preliminar de possíveis locais de instalação, mas tal estudo indicou a necessidade de verificar o sombreamento de forma mais detalhada.

Dessa forma, a localização definida para a instalação da árvore solar fotovoltaica levou em consideração, principalmente, os seguintes aspectos: o possível sombreamento causado objetos próximos, a logística do posicionamento do inversor, a chance de trazer visibilidade para o uso de energia fotovoltaica por parte da comunidade e a segurança da estrutura e dos seus componentes.

O local escolhido foi o jardim interno da Faculdade de Tecnologia por ele apresentar uma boa área descoberta livre de sombras, relativa proximidade com a guarita (onde está um dos quadros elétricos do prédio e local onde será colocado o inversor), por oferecer certa segurança e por ser um ponto com grande circulação de pessoas.

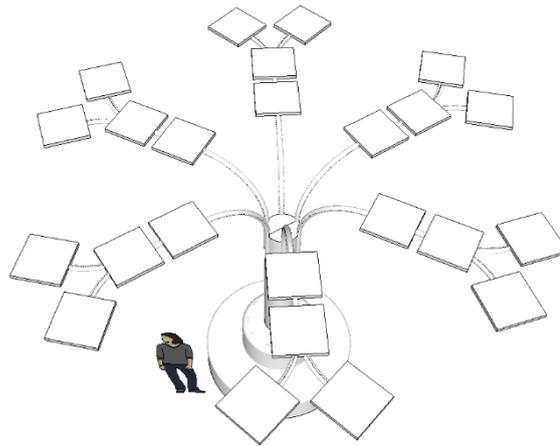
#### **4.1.3 Modelo 3D**

Para auxiliar na escolha do local de instalação do projeto e em sua análise técnica, principalmente no que diz respeito ao estudo de sombreamento, utilizaram-se modelos

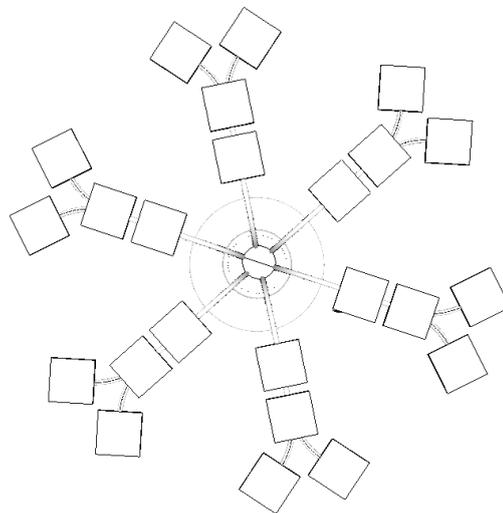
tridimensionais do protótipo da árvore e da Faculdade de Tecnologia (FT) elaborados no *software* SketchUp.

A seguir é possível observar algumas vistas do desenho tridimensional da árvore solar fotovoltaica na Figura 4.1.

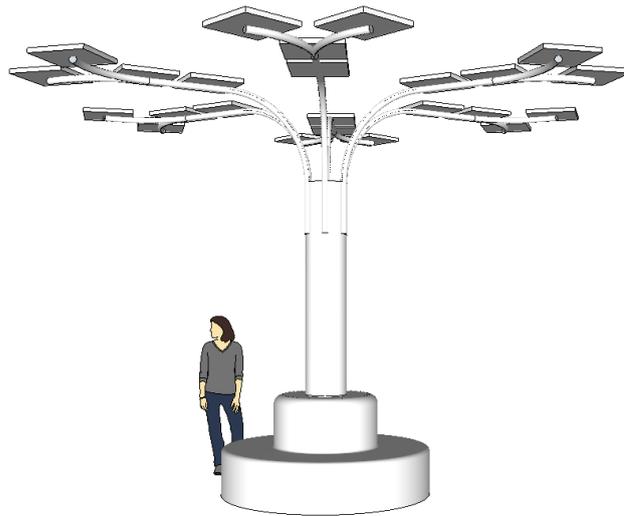
*Figura 4.1 – Vistas do modelo da árvore solar obtidas a partir do modelo 3D.*



(a)



(b)



(c)

*Fonte: Modelo da árvore solar elaborado no software SketchUp.*

Cabe destacar que o modelo 3D da árvore solar foi elaborado ainda na etapa de concepção do projeto e remete a estrutura pensada para um maior aproveitamento da irradiação local. Trata-se então do modelo teórico da árvore, considerado neste trabalho como o caso 1.

Já a Figura 4.2 traz as vistas do modelo da FT mostrando o seu jardim interno, local previsto para a implementação do projeto.

*Figura 4.2 – Vistas da Faculdade de Tecnologia obtidas a partir do seu modelo 3D.*



(a)



(b)



(c)

*Fonte: Modelo elaborado no SketchUp.*

A partir dos desenhos em escala, foi feito o posicionamento da árvore no local escolhido dentro da Faculdade de Tecnologia, para checar as dimensões do protótipo em relação à área designada e permitir a verificação das sombras projetadas sobre ele.

#### **4.1.4 Estudo de sombreamento**

Nesta etapa do trabalho, foi feita uma análise em maiores detalhes do local indicado para instalação da árvore solar. Levando-se em consideração, principalmente, o objetivo de

posicionar o protótipo de modo a obter uma maior exposição ao Sol, realizou-se um estudo de sombreamento do jardim interno da FT.

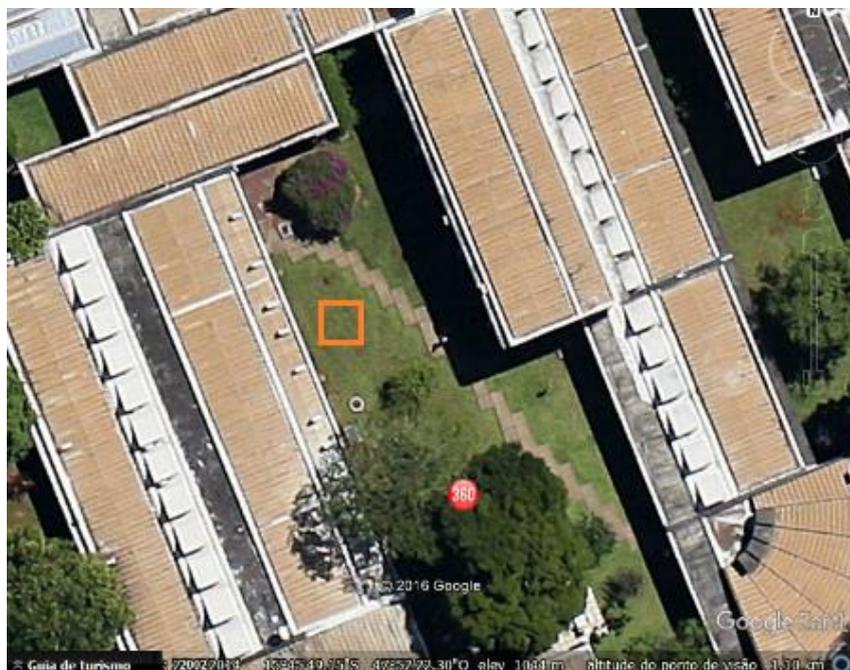
Neste estudo foram utilizados o *software* SketchUp e os modelos computacionais em 3D que representam a árvore e a Faculdade de Tecnologia da UnB. O primeiro passo foi realizar o georreferenciamento do modelo, isto é, determinar as coordenadas geográficas do local de instalação e inseri-las no *software*. Esta etapa é feita para que o SketchUp possa indicar o comportamento e o movimento do sol e das sombras que ele projeta no exato ponto geográfico que se deseja avaliar.

As coordenadas do ponto em questão e a representação gráfica do local definido (Figura 4.3) foram obtidas com auxílio da ferramenta Google Earth Pro e podem ser verificadas a seguir.

Georreferência do Modelo (obtida com o Google Earth Pro):

- Latitude: 15°45'49.15'' S
- Longitude: 47°52'22.30'' O

Figura 4.3 – Fotografia aérea da Faculdade de Tecnologia da UnB com destaque para o local de instalação da árvore solar (editada pela autora).



Fonte: Google Earth Pro – Acessado em 12/05/2017.

Em seguida, com o modelo da FT georreferenciado no SketchUp e com a árvore solar posicionada no local determinado, foi utilizada a ferramenta '*Shadows*', que faz parte do pacote

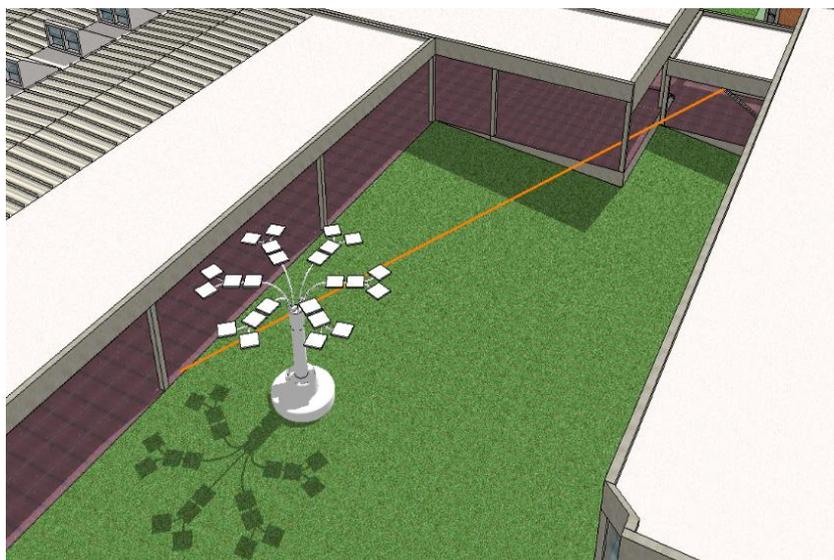
do programa e que possibilita a verificação das sombras projetadas sobre um local para qualquer data do ano e em qualquer horário.

No estudo de sombreamento, observaram-se especialmente as datas dos solstícios de verão e de inverno e em horários distintos ao longo do dia. Sabendo que o dia mais crítico é 21 de junho (solstício de inverno), por apresentar menos tempo de luz solar, tomou-se esse dia como referência e verificou-se a projeção das sombras sobre o local de instalação e as sombras do próprio modelo da árvore. Seguem então as figuras referentes ao sombreamento neste dia.

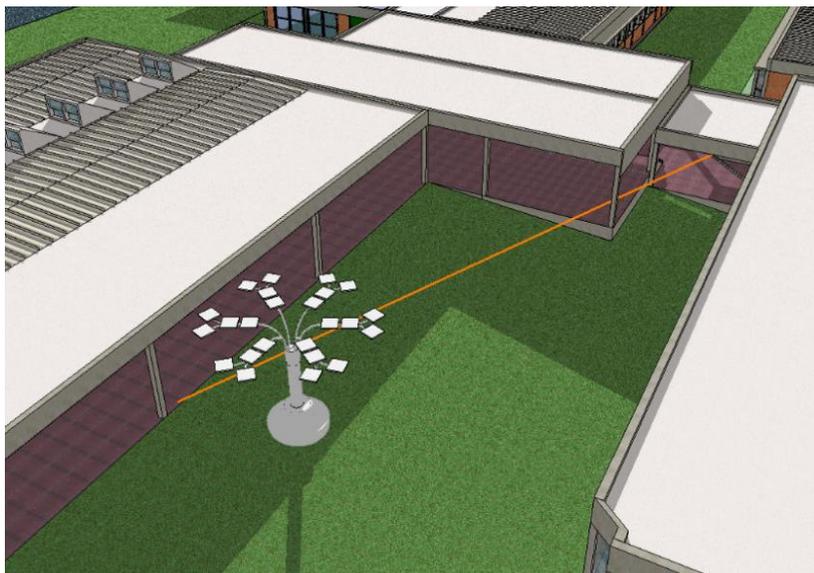
*Figura 4.4 – Sombreamento no local para o dia 21 de junho às (a) 9h, (b) 13h e (c) 16h.*



(a)



(b)



(c)

Fonte: Imagens produzidas com auxílio da ferramenta Shadows do SketchUp.

#### 4.1.5 Dimensionamento

A árvore solar fotovoltaica foi dimensionada em seu pré-projeto, realizado no já citado trabalho acadêmico que antecedeu o presente trabalho e que foi concluído no ano de 2014. Nesta primeira produção acadêmica sobre o tema o objetivo era “apresentar opções de implantação e custo, dentro da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB), de um possível modelo de Árvore Solar – Sistema Fotovoltaico conectado à rede elétrica com *design* em formato abstrato de árvore” (Barbosa, 2014).

- Ainda no estudo anterior, os critérios adotados foram:
- Sistema solar FV conectado à rede e sem baterias, com potência de pico de 1kW;
- Sistema de monitoramento de dados para acompanhamento do desempenho da geração de energia elétrica, para divulgação ao público e utilização em pesquisas;
- Estrutura em formato abstrato de “árvore” (com painéis simulando as folhas que formariam a copa da árvore);
- Localizado dentro da FT, em local de grande movimentação para que seja bastante visualizado e divulgado ao público; e
- Escolha de fornecedores nacionais, com equipamentos disponíveis para pronta entrega (Barbosa, 2014).

Assim, o trabalho apresentou uma proposta de projeto e uma análise de custos bastante detalhada para a instalação de uma árvore solar na FT. Apresentou-se também uma alternativa de projeto com potência de pico de 1,5kWp, além de modelos e arranjos para os painéis que poderiam compor o sistema.

Decidiu-se então, à época do pré-projeto, que o sistema teria 24 painéis solares da marca Yinlgi Solar com potência de pico igual a 55 Wp (suas especificações técnicas encontram-se na seção de ‘apêndices’). Dessa forma, a árvore solar apresentaria, como capacidade de geração, uma potência nominal de 1320 Wp. As principais características dos módulos podem ser verificadas na Tabela 4.1 a seguir.

*Tabela 4.1 – Características técnicas dos módulos fotovoltaicos do projeto.*

<b>Características dos módulos</b>	
<b>Fabricante</b>	Yinlgi Solar
<b>Modelo</b>	YL55P 17b 2/5 (55Wp)
<b>Potência nominal dos módulos (Wp)</b>	55
<b>Voc módulo (V)</b>	22,07
<b>Vmp módulo (V)</b>	17,83
<b>Isc módulo (A)</b>	3,28
<b>Quantidade de módulos</b>	24
<b>Voc max (V)</b>	789,06
<b>Vmp min (V)</b>	545,60
<b>Vmp max (V)</b>	640,46
<b>Potência nominal do arranjo (kWp)</b>	1,32

Algo comum em inversores para conexão como a rede elétrica é o fato de possuírem uma ou mais entradas MPPT. Isso é feito para que haja a maximização da potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, pois assim eles são capazes de operar constantemente em seu ponto de máxima potência, independentemente das condições que afetam o desempenho e alteram a curva característica de corrente e tensão do conjunto de módulos (Villalva, 2015).

O inversor central escolhido foi o modelo Fronius Galvo 1.5-1 de 1,5 kW, da marca Fronius. Segundo suas especificações técnicas (também encontradas na seção de ‘apêndices’ deste trabalho) este modelo de inversor apresenta uma entrada MPPT, o que já permite um melhor desempenho do SFV. Observam-se as principais características do inversor na Tabela 4.2 que segue.

Tabela 4.2 – Características técnicas do inversor do projeto.

<b>Características do inversor</b>	
<b>Fabricante</b>	Fronius
<b>Modelo</b>	Fronius Galvo 1.5-1
<b>Potência nominal do inversor (kW)</b>	1,5
<b>Quantidade de inversores</b>	1
<b>Tensão de entrada máxima (V)</b>	420
<b>Corrente máxima de entrada (A)</b>	13,3A
<b>Quantidade de rastreadores MPPT</b>	1
<b>Faixa de tensão MPPT (V)</b>	120-335

O número de módulos a serem conectados em série para um inversor conectado à rede é determinado de acordo com a tensão máxima permitida na entrada CC e com a faixa de tensão útil do inversor. Ao determinar o número de módulos na *string* (em série), deve-se verificar as características do módulo no catálogo do fabricante e multiplicar seus valores de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e da tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) pelo número de módulos em série. Os resultados devem estar de acordo com as características do inversor empregado no projeto (Villalva, 2015).

Recomenda-se que as tensões calculadas estejam 10% abaixo das tensões especificadas para o inversor, especialmente a máxima tensão admissível, como margem de segurança para eventuais variações de temperatura que alterem a tensão de saída nos módulos (Villalva, 2015).

Ainda no dimensionamento de um sistema fotovoltaico, também é comum sobredimensionar levemente o conjunto de módulos no gerador (ou subdimensionar o inversor), pois a potência de pico do conjunto somente é atingida em condições padronizadas de teste (STC) e, na maior parte do tempo, o gerador fotovoltaico oferece uma potência abaixo da sua capacidade nominal. Além disso, ligar ao inversor um conjunto com potência de pico ligeiramente maior que a suportada por ele não causa danos ao equipamento, apenas impede o aproveitamento da potência máxima caso o sistema opere com sua capacidade nominal (Villalva, 2015).

Observa-se, no entanto, que tal prática não foi adotada no pré-projeto do sistema da árvore solar em questão e, a partir das especificações técnicas e dados dos componentes, já é possível verificar que o inversor foi superdimensionado.

Para realizar descrição e o dimensionamento do sistema da Árvore Solar Fotovoltaica no presente Trabalho de Conclusão de Curso, foram utilizadas as ferramentas de *design* de projeto do PVsyst.

Para os casos 1 e 2, o sistema foi dimensionado com os mesmos componentes, dado que eles eram fatores fixos no projeto por já estarem comprados. Assim, no PVsyst, foram definidos a localização do projeto (que também é a mesma para os dois casos), a orientação e inclinação dos módulos (na seção *Orientation* do *software*), os modelos e potências dos painéis e do inversor, o arranjo e a interligação dos componentes do sistema (na seção *System*).

A descrição do sistema na seção *System* do PVsyst é um parâmetro de entrada obrigatório. Nela são determinados os modelos e quantidades de painéis e inversor usados no projeto, além de apresentar sugestões para o arranjo dos componentes. Ao final do processo, ainda há avisos de problemas ou incompatibilidades no sistema. Para o projeto da árvore solar, verificou-se nessa etapa um aviso que comprovou o superdimensionamento do inversor, como mostra a Figura 4.5 a seguir.

Figura 4.5 – Indicação de sobredimensionamento do inversor no PVsyst.

The screenshot displays the PVsyst software interface with the following sections and data:

- Global System configuration:** 1 Number of kinds of sub-arrays.
- Global system summary:**

Nb. of modules	24	Nominal PV Power	1.3 kWp
Module area	10 m <sup>2</sup>	Maximum PV Power	1.3 kWdc
Nb. of inverters	1	Nominal AC Power	1.5 kWac
- PV Array:**
  - Sub-array name and Orientation:** Name: PV Array, Tilt: 23°, Azimuth: 0°.
  - Presizing Help:** No sizing selected. Enter planned power: 1.3 kWp, or available area(modules): 10 m<sup>2</sup>.
  - Select the PV module:** Available Now, Yingli 55 Wp 15V Si-poly YL55P 17b 2/5 (55Wp), Manufacturer: [Open]. Sizing voltages: Vmpp (60°C) 15.0 V, Voc (-10°C) 24.8 V.
  - Select the inverter:** Available Now, Fronius International 1.5 kW 120 - 335 V HF Tr 50/60Hz Galvo 1.5-1 Since 2013, [Open]. Nb. of inverters: 1. Operating Voltage: 120-335 V, Input maximum voltage: 420 V, Global Inverter's power: 1.5 kWac.
- Design the array:**
  - Number of modules and strings:** Mod. in series: 12, Nbre strings: 2, Overload loss: 0.0%, Pnom ratio: 0.88, Show sizing.
  - Operating conditions:** Vmpp (60°C) 180 V, Vmpp (20°C) 219 V, Voc (-10°C) 298 V.
  - Plane irradiance:** 1000 W/m<sup>2</sup>.
  - Max. operating power at 1000 W/m<sup>2</sup> and 50°C:** 1.2 kW (STC selected).
  - Array nom. Power (STC):** 1.3 kWp.

A red-bordered warning box in the bottom right corner states: "The inverter power is slightly oversized."

Fonte: PVsyst

Finalmente, os parâmetros de perdas para os dois sistemas dimensionados também apresentam os mesmos valores e estão definidos na Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3 – Parâmetros de perdas adotados no dimensionamento do projeto no PVSyst

Parâmetros de Perdas	
Térmicas	$U_c=29\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (*)
Ôhmicas	1,5% (**)
Qualidade do módulo	2,5% (**)
Mismatch	1% (**)
Degradação pela Luz	2% (**)
Acúmulo de sujeira nos módulos	3% (**)

(\*) painéis instalados sobre bases vazadas com livre circulação de ar

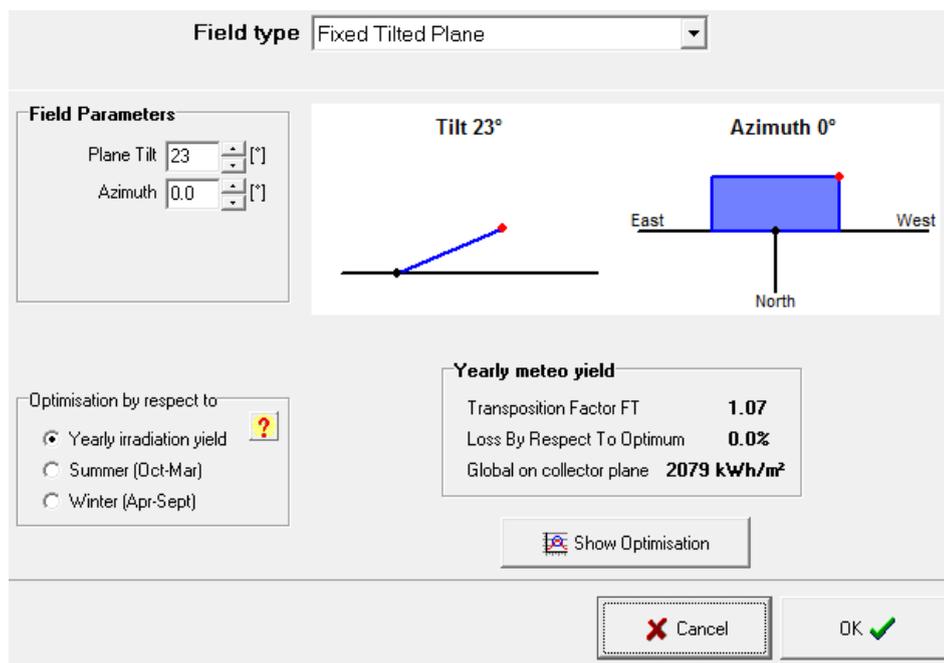
(\*\*) valor sugerido pelo PVSyst

#### 4.1.6 Definição da configuração

A definição da configuração do sistema da árvore solar foi feita de formas diferentes para cada um dos casos respeitando as limitações do projeto e da ferramenta computacional utilizada na análise.

No caso 1, que apresenta os “galhos” em um mesmo plano, sem curvatura e os módulos em uma mesma orientação, foi utilizada a análise do PVSyst para a otimização dos ângulos de inclinação e azimute (Figura 4.6). Assim, foi possível definir a configuração a partir das recomendações do *software* para os ângulos de orientação otimizados e para a quantidade de módulos por *string* que fosse adequada considerando as especificações técnicas dos modelos de inversor e módulos.

Figura 4.6 – Indicação da ferramenta de definição da orientação dos painéis no PVSystem.

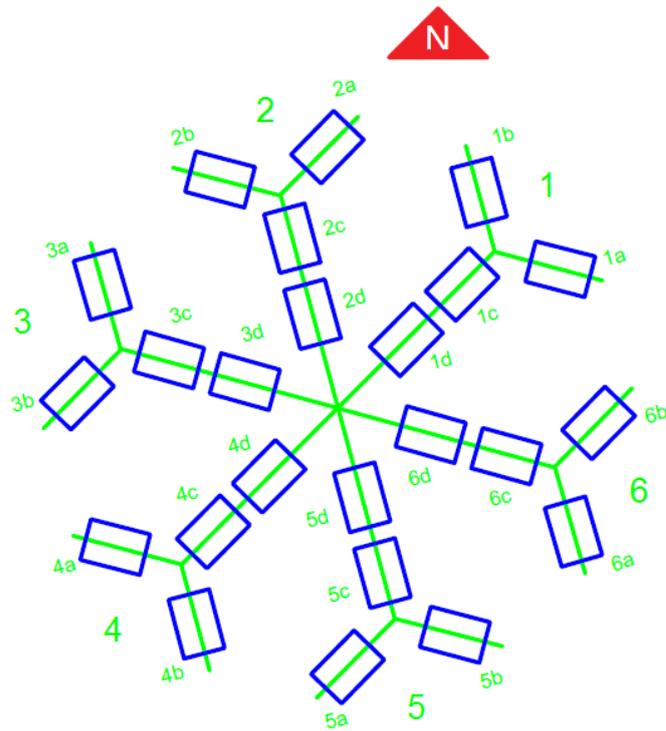


Fonte: PVSystem.

O caso 2 levou em consideração as mesmas limitações do caso 1 sendo necessário, porém, acrescentar mais uma: o fato de basear-se no modelo real da árvore solar após a sua construção e montagem. Uma vez que a estrutura foi instalada, constatou-se que o modelo tal qual foi construído, apresenta um *design* mais orgânico, com “galhos” curvos e bases de encaixe para os painéis com orientações variadas. Dessa forma, foi preciso realizar algumas etapas extras para determinar o melhor arranjo dos componentes no sistema.

Primeiramente, estimaram-se os ângulos de orientação dos módulos através de uma análise geométrica da estrutura montada. Tal análise avaliou os ângulos de inclinação dentro de uma escala de 0 a 90° e utilizando como referência positiva a face voltada para o norte. Já para os ângulos de azimute, a escala considerada foi de -180° Em seguida, foi elaborado um desenho esquemático da vista superior da árvore que servisse de referência para relacionar o modelo com os ângulos de inclinação e azimute estimados dos painéis. A Figura 4.7 traz o esquemático feito para a vista superior da estrutura. Nele é possível observar a metodologia empregada para distinguir e referenciar cada parte do modelo (cada “galho” com suas respectivas bases para instalação de painéis).

Figura 4.7 – Esquemático da vista superior da Árvore Solar Fotovoltaica da FT.



Fonte: Desenho produzido com auxílio do AutoCAD.

O desenho apresenta ainda a direção do norte verdadeiro em relação à estrutura da árvore. Em medições no local onde ela está instalada, verificou-se que o deslocamento do “galho” 2 em relação ao norte é de  $15^\circ$  para a esquerda (algo correspondente a  $-15^\circ$  ou, considerando uma circunferência completa de  $360^\circ$ , seria equivalente a  $345^\circ$ ).

Produziu-se então uma tabela com os valores de inclinação e azimute estimados por geometria para cada uma das bases para os painéis. Alguns ajustes posteriores de limitação dos ângulos foram necessários para adequação às referências adotadas pelo PVSyst. Os resultados que foram obtidos na primeira análise encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Ângulos estimados de inclinação e azimute dos painéis na árvore.

Painel	Inclinação	Azimute
<b>1a</b>	15°	-15°
<b>1b</b>	15°	15°
<b>1c</b>	10°	45°
<b>1d</b>	10°	45°
<b>2a</b>	15°	45°
<b>2b</b>	15°	-15°
<b>2c</b>	30°	-135°
<b>2d</b>	45°	-135°
<b>3a</b>	10°	-165°
<b>3b</b>	10°	45°
<b>3c</b>	20°	-45°
<b>3d</b>	30°	-45°
<b>4a</b>	15°	-105°
<b>4b</b>	20°	105°
<b>4c</b>	15°	-45°
<b>4d</b>	20°	-45°
<b>5a</b>	10°	20°
<b>5b</b>	10°	-20°
<b>5c</b>	35°	15°
<b>5d</b>	30°	15°
<b>6a</b>	20°	15°
<b>6b</b>	20°	45°
<b>6c</b>	30°	75°
<b>6d</b>	45°	75°

Ainda para determinar a configuração do sistema no caso 2, a etapa seguinte consistiu na descrição do sistema no PVSyst para que fosse possível realizar posteriormente a etapa de simulação da quantidade de energia produzida. Ao utilizar a ferramenta Project Design do *software*, após inserir a localização do projeto, deve-se descrever a orientação dos painéis, com auxílio de gráficos de otimização para os ângulos de inclinação e azimute. Nessa etapa o PVSyst ainda apresenta os valores de irradiação e perdas sobre o painel de acordo com a orientação escolhida. Para as orientações estimadas dos módulos têm-se os valores de irradiação mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Taxas de irradiação sobre os painéis estimadas pelo PVSyst.

<b>Painel</b>	<b>Irradiação [kWh/m<sup>2</sup>]</b>
<b>1a</b>	2058
<b>1b</b>	2058
<b>1c</b>	2008
<b>1d</b>	2008
<b>2a</b>	2024
<b>2b</b>	2058
<b>2c</b>	1628
<b>2d</b>	1403
<b>3a</b>	1844
<b>3b</b>	2008
<b>3c</b>	2027
<b>3d</b>	2006
<b>4a</b>	1855
<b>4b</b>	1859
<b>4c</b>	1994
<b>4d</b>	1992
<b>5a</b>	2031
<b>5b</b>	2030
<b>5c</b>	2036
<b>5d</b>	2060
<b>6a</b>	2071
<b>6b</b>	2029
<b>6c</b>	1914
<b>6d</b>	1800

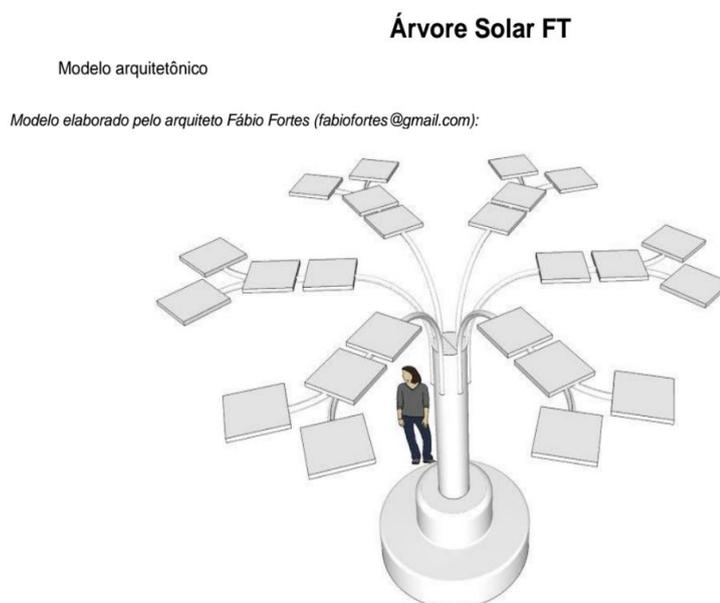
Uma vez feita a avaliação da orientação e da irradiação sobre cada módulo, consideraram-se aspectos como o modelo de inversor utilizado, a quantidade de entradas MPPT que ele possui e como descrever a situação do sistema para o PVSyst. Optou-se por distribuir os painéis igualmente em 3 *strings* com o intuito de obter a melhor eficiência possível para o sistema (verificada posteriormente com a simulação de operação), ordenaram-se os painéis de acordo com o valor da irradiação sobre eles para que os de pior desempenho não prejudicassem tanto os de melhor.

Conforme dito anteriormente, determinar o arranjo do caso 1 é mais simples pois os painéis estão em um mesmo plano horizontal e com orientações iguais, o que significa que eles apresentam a mesma capacidade de geração e podem ser distribuídos entre as entradas do inversor sem que haja uma preocupação com o desempenho de um afetar o outro. Já para caso 2, em que foi necessário realizar as etapas aqui descritas, o processo de determinar a configuração do projeto avaliou o arranjo final da árvore solar após sua construção e montagem, e foi fundamental para orientar o projeto elétrico e a futura instalação das placas solares para que a geração seja a melhor possível dentro das limitações da estrutura.

#### 4.1.7 Concepção, construção e instalação da árvore solar na FT

A árvore solar da Faculdade de Tecnologia começou a ser elaborada a partir do estudo de 2014. No ano seguinte, foi solicitado ao arquiteto responsável da Faculdade de Tecnologia da UnB que apresentasse algumas propostas para o *design* e concepção da estrutura e um modelo arquitetônico da árvore foi criado. Tal modelo foi adotado neste trabalho como o caso 1, e é novamente mostrado pela Figura 4.8 a seguir.

Figura 4.8 – Modelo arquitetônico concebido da árvore solar na fase de pré-projeto.



Fonte: Modelo elaborado por Fábio Fortes, arquiteto da FT

Observando a figura, e conforme mencionado anteriormente, o modelo do caso 1 apresenta os “galhos” em um mesmo plano horizontal, o que permite ajustar os painéis de forma que eles tenham a mesma orientação (embora eles não tenham sido apresentados dessa forma no modelo). Seguindo o dimensionamento que foi feito anteriormente, a árvore conta com 6 galhos e 4 painéis em cada um, totalizando os 24 painéis do projeto.

Em seguida, buscaram-se meios para que o protótipo da árvore solar pudesse ser construído. Ao final do ano de 2015, foi solicitado a técnicos da prefeitura do campus que começassem o trabalho. Nesse processo, um fato bastante significativo para o projeto como um todo é que a árvore foi construída com material reciclado, a partir do reaproveitamento de antigos postes de iluminação. Além de reduzir os gastos com o projeto, isso ainda chama a atenção para atitudes ecologicamente sustentáveis e que diminuam os danos ao meio ambiente, o que também é o foco deste projeto.

Para a construção da árvore foi necessário buscar o material (as partes dos postes desativados), cortar e alinhar o metal e fazer as bases de fixação para os painéis fotovoltaicos. O trabalho de serralheria incluiu a confecção e moldagem das partes da estrutura da árvore. Com o fato de o material utilizado ser originalmente de postes de iluminação, boa parte das peças já era adequada para o *design* da árvore e não precisou ser modelada. Basicamente, apenas alguns detalhes dos “galhos” e das bases para os painéis precisaram de modelagem e de material que não era reciclado.

Houve uma preocupação, por parte do responsável técnico pela construção do protótipo, com o *design* da árvore, bem como com a incidência solar sobre ela. Optou-se por construir um modelo com *design* mais orgânico, com algumas adaptações em relação ao projeto arquitetônico original (caso 1 deste trabalho). Foi dada ainda uma atenção ao transporte e montagem da árvore. Neste caso a solução pensada pelo responsável técnico da Prefeitura foi confeccionar a estrutura em peças encaixáveis, mas que, ao serem montadas, ainda oferecessem estabilidade e segurança para o protótipo.

Assim, o produto final da construção da árvore incluiu: uma haste principal de ferro (que serviria de “tronco”); uma peça de encaixe para os “galhos” na haste principal; os 6 “galhos” com as bases para os painéis soldadas a eles; um tambor oco para a base da árvore (feito em duas partes para proporcionar uma abertura lateral); e um suporte para, futuramente (se houver necessidade), adicionar uma bateria ao projeto. Toda essa etapa de construção da estrutura da árvore foi finalizada em junho de 2016 e as partes entregues, tais como foram descritas, podem ser observadas na Figura 4.9 a seguir.

Figura 4.9 – (a) Partes desmontadas da estrutura da árvore solar da FT e (b) destaque para um dos “galhos”.



(a)



(b)

*Fonte: Fotografias feitas pela autora em visita ao local*

Após a aquisição por parte da Universidade dos equipamentos escolhidos no pré-projeto e a construção da estrutura por parte dos técnicos da prefeitura do campus, começaram as preparações (já durante a realização deste trabalho) para a instalação da árvore solar na FT. avaliaram-se aspectos técnicos como a posição (determinada a partir do estudo de sombreamento), nivelamento do terreno, orientação para o norte verdadeiro, fixação da base da árvore com concreto (para proporcionar mais segurança e sustentação), inclinação dos painéis e determinação da seção do eletroduto para a instalação elétrica dos componentes em um

segundo momento. Além disso, também foram considerados alguns aspectos arquitetônicos da integração da árvore com o local, como a necessidade de um piso ao redor da estrutura, uma calçada de acesso e a possibilidade de incluir um assento de madeira na estrutura para que o tambor possa vir a servir de banco.

Em setembro de 2017, tiveram início as obras para implementação do projeto. O primeiro passo foi delimitar o local exato de instalação. Em seguida, foi feito o nivelamento do terreno e cavou-se um buraco com cerca de 1,5m de profundidade para fazer a fundação com tubulão da estrutura. Também foi necessário fazer uma parede de tijolos para contenção da terra adicionada no nivelamento. Os passos seguintes incluíram preparar uma moldura de madeira para a concretagem do piso e da calçada de acesso, posicionar a haste principal dentro do tubulão e realizar a concretagem do buraco com a haste e do piso ao redor dela. Durante toda a etapa de instalação da estrutura da árvore solar, houve uma preocupação com a ação do tempo e dos ventos sobre o protótipo, além do peso da estrutura quando finalizada a montagem. Por isso todos os passos seguidos nesta etapa foram realizados com o intuito de conferir estabilidade e sustentação ao sistema.

As fotografias apresentadas na Figura 4.10 a seguir ilustram o passo a passo realizado para a implementação e a montagem da estrutura da árvore solar.

*Figura 4.10 – Obras para implementação da estrutura com destaques para (a) parede de contenção. (b) nivelamento do terreno, (c) tubulão, (d) fixação da haste principal e (e) concretagem do piso.*



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

*Fonte: Fotografias feitas pela autora em visita ao local*

Finalmente, uma vez que o concreto já estava seco e a estrutura encontrava-se firme, colocaram-se andaimes no piso ao redor da haste para a finalização da montagem com o encaixe dos “galhos” da árvore em suas devidas posições. O arranjo final do modelo pode ser observado na Figura 4.11.

*Figura 4.11 – Arranjo final da estrutura montada da árvore solar da FT visto de direções distintas.*



(a)



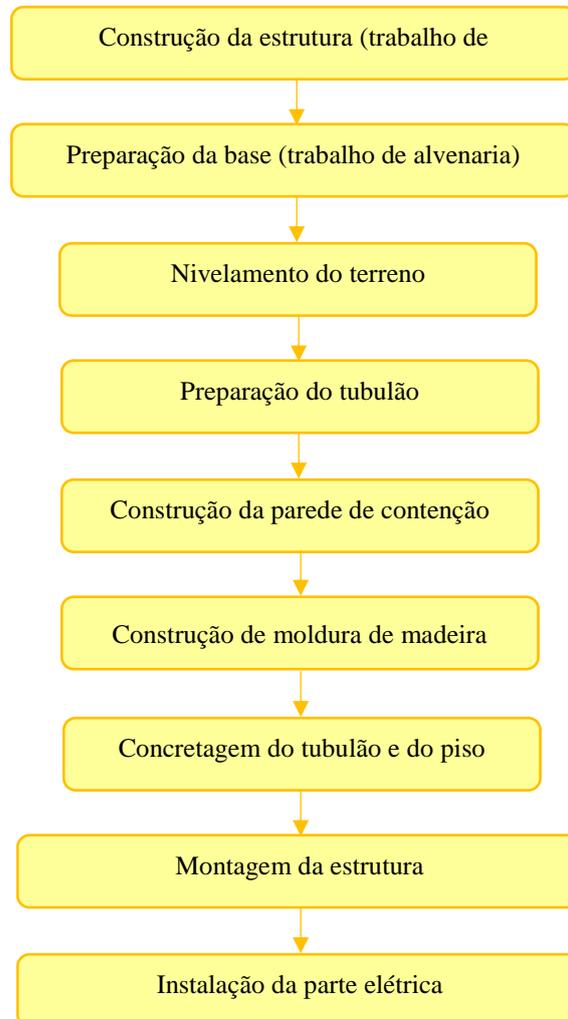
(b)

*Fonte: Fotografias feitas pela autora em visita ao local*

Após a finalização da montagem da estrutura da árvore, aventou-se a possibilidade de adicionar cabos esticadores de aço ao protótipo. São previstos três esticadores que devem conectar a árvore solar a pontos de apoio no solo ou às marquises das construções próximas. Isso é necessário para conferir mais estabilidade e segurança à estrutura, minimizando, ou até mesmo evitando, o balanço da árvore com a ação do vento.

De forma resumida, tem-se então um fluxograma com as etapas realizadas na implementação do projeto da árvore solar na FT apresentado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Fluxograma das etapas de implementação da árvore solar da FT.



É importante mencionar, no entanto, que apesar de última etapa, de instalação da parte elétrica estar encaminhada, com os equipamentos comprados e o projeto elétrico feito, ela ainda está pendente devido algumas questões burocráticas relativas ao andamento de processos de contratação de serviços e compra de componentes.

#### 4.1.8 Simulação

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, para auxiliar com o dimensionamento, permitir a simulação do sistema e determinar os principais resultados dos casos 1 e 2 no PVSyst, foi necessário definir a localização do projeto, a orientação e inclinação

dos módulos, os modelos e potências dos painéis e do inversor, a interligação dos componentes do sistema e os parâmetros de perdas.

A partir de tais definições e do dimensionamento do projeto, é possível realizar a simulação da operação do sistema e obter resultados que permitem avaliar o efeito de variações sazonais da irradiação, a energia gerada (e no caso deste trabalho, injetada na rede elétrica), eficiência do sistema, entre outros parâmetros, e em intervalos de tempo que vão de horas até meses.

A simulação auxiliou ainda na verificação de arranjos mais eficientes para cada caso. Nela foi necessário considerar as limitações do PVSyst e do projeto.

No caso 2, apesar de cada painel apresentar orientações diferentes, o modelo descrito na ferramenta computacional permite misturar apenas duas orientações e, pelos dados de entrada do inversor, o sistema permite no máximo a divisão em 3 *strings*. Assim, para simular esse caso, o procedimento realizado foi: como o rendimento do pior módulo afeta os outros da *string*, ordenaram-se os módulos daqueles cuja orientação oferecia maior irradiação até os de menor (Tabela 4.6); testou-se a geração do sistema para 2 *strings* com 12 módulos cada, uma *string* com a orientação 1 (referente ao décimo segundo módulo) e outra com a orientação 2 (referente ao módulo de pior irradiação) – conforme indicam as setas à direita; em seguida o teste foi feito para 3 *strings*, com 8 módulos cada, duas *strings* com orientação 1 (orientação do décimo sexto módulo da tabela) e uma com orientação 2 (novamente, a orientação do pior módulo) – conforme indicam as setas da esquerda. Na comparação da capacidade de geração para os dois arranjos, confirmou-se a maior eficiência daquele com 3 *strings*.

Tabela 4.6 – Ordenação dos painéis de acordo com as taxas de irradiação.

Painel	Inclinação	Azimute	Irradiação [kWh/m <sup>2</sup> ]
6a	20°	15°	2071
5d	30	15°	2060
1a	15	-15°	2058
1b	15	15°	2058
2b	15	-15°	2058
5c	35	15°	2036
5a	10	20°	2031
5b	10	-20°	2030
6b	20	45°	2029
3c	20	-45°	2027
2a	15	45°	2024
1c	10	45°	2008
1d	10	45°	2008
3b	10°	45°	2008
3d	30°	-45°	2006
4c	15°	-45°	1994
4d	20°	-45°	1992
6c	30°	75°	1914
4b	20°	105°	1859
4a	15°	-105°	1855
3a	10°	-165°	1844
6d	45°	75°	1800
2c	30°	-135°	1628
2d	45°	-135°	1403

No caso 1, a simulação foi mais simples devido ao fato de os módulos apresentarem a mesma orientação. Assim, verificou-se que o arranjo mais eficiente é o que divide os módulos em 2 *strings* com 12 painéis cada e com a orientação otimizada de 23° de inclinação e 0° de azimute.

Dessa forma, os resultados obtidos para as simulações dos casos 1 e 2 no PVSystem, principalmente no que diz respeito à capacidade de geração podem ser observados nas Tabelas 4.7 e 4.8. Eles permitem determinar as diferenças em cada modelo, qual deles apresenta maior

eficiência e quão diferentes são os valores de eficiência para justificar a escolha por um modelo específico.

*Tabela 4.7 – Resultados da simulação feita no PVSyst – caso 1.*

<b>Modelo teórico - Caso 1</b>	
Potência nominal dos módulos (Wp)	55
Quantidade de módulos	24
<b>Orientação dos módulos (inclinação/azimute)</b>	<b>23°/0°</b>
<b>Quantidade de módulos série (string)</b>	<b>12</b>
<b>Número de Strings</b>	<b>2</b>
Potência nominal do arranjo (kWp)	1,32
Potência em condições de operação – 50°C (kWp)	1,188
<b>V<sub>mpp</sub> (V)</b>	<b>193</b>
<b>I<sub>mpp</sub> (A)</b>	<b>6,2</b>
Área ocupada (m <sup>2</sup> )	10
Potência nominal do inversor (kW)	1,5
Quantidade de inversores	1
Tensão de operação (V)	120-335
Performance ratio (%)	79,95
<b>Geração anual de energia (kWh/ano)</b>	<b>2168,0</b>

Tabela 4.8 – Resultados da simulação feita no PVSyst – caso 2.

<b>Modelo real - Caso 2</b>	
Potência nominal dos módulos (Wp)	55
Quantidade de módulos	24
<b>Orientação 1 dos módulos (inclinação/azimute)</b>	<b>15°/45°</b>
<b>Orientação 2 dos módulos (inclinação/azimute)</b>	<b>45°/-135°</b>
<b>Quantidade de módulos série (string)</b>	<b>8</b>
<b>Número de Strings</b>	<b>3 (*)</b>
Potência nominal do arranjo (kWp)	1,32
Potência em condições de operação – 50°C (kWp)	1,188
<b>V<sub>mpp</sub> (V)</b>	<b>128</b>
<b>I<sub>mpp</sub> (A)</b>	<b>9,3</b>
Área ocupada (m <sup>2</sup> )	10
Potência nominal do inversor (kW)	1,5
Quantidade de inversores	1
Tensão de operação (V)	120-335
<i>Performance ratio</i> (%)	78,86
<b>Geração anual de energia (kWh/ano)</b>	<b>1869,2</b>

(\*) 2 *strings* com orientação 1/ 1 *string* com orientação 2

Conforme observado dos resultados anteriores, o modelo do caso 1 é comprovadamente mais eficiente em termos de geração de energia durante o ano, apresentando um valor de 2168,0 kWh/ano, contra os 1869,2 kWh/ano gerados no caso 2. Trata-se de uma diferença percentual de 13,78% entre as capacidades de geração. Para que seja possível avaliar a geração mensal de cada caso, apresentam-se as curvas de potencial de geração de energia fotovoltaica em um dia médio de cada mês nos Gráfico 4.2 e 4.4 e a discriminação do total de energia gerada em cada mês nos Gráficos 4.3 e 4.5 a seguir.

Gráfico 4.2 – Curvas de geração em um dia médio de cada mês – caso 1.

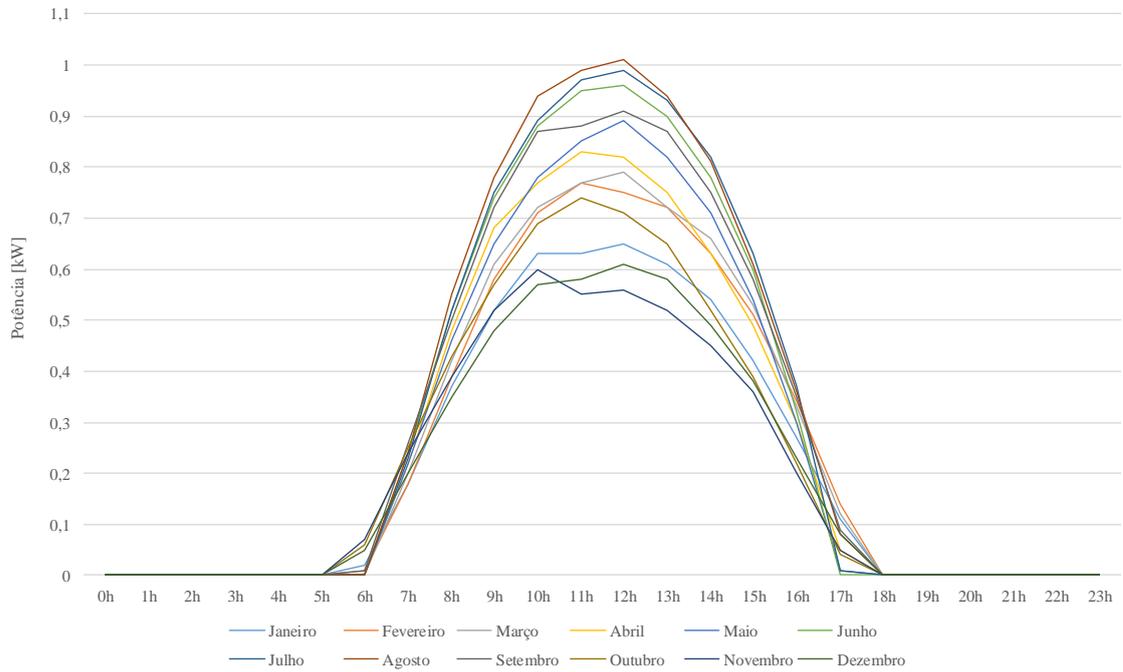


Gráfico 4.3 – Energia total gerada em cada mês – caso 1.

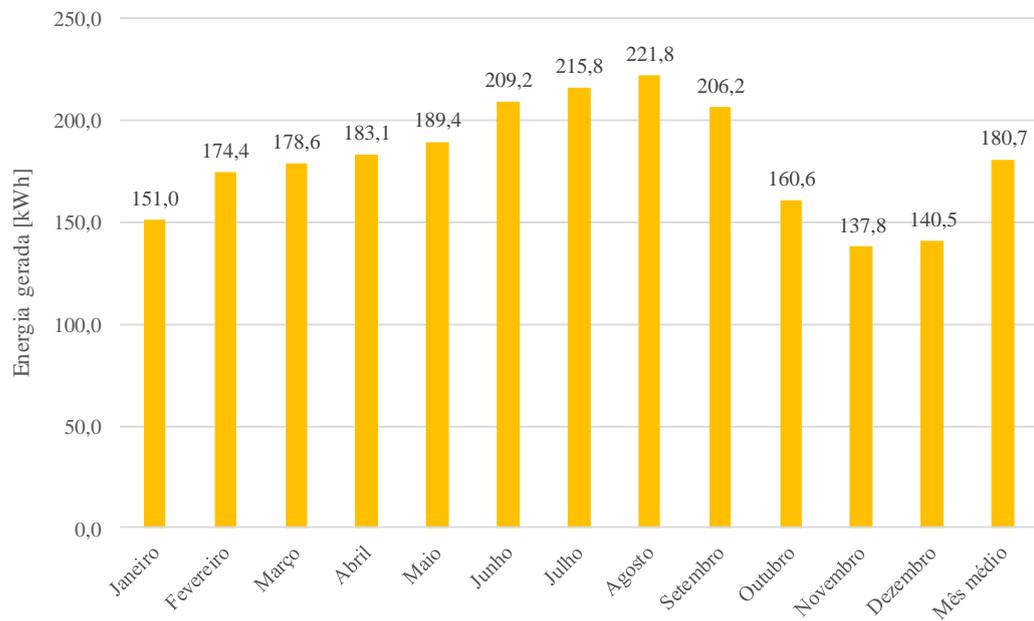


Gráfico 4.4 – Curvas de geração em um dia médio de cada mês – caso 2.

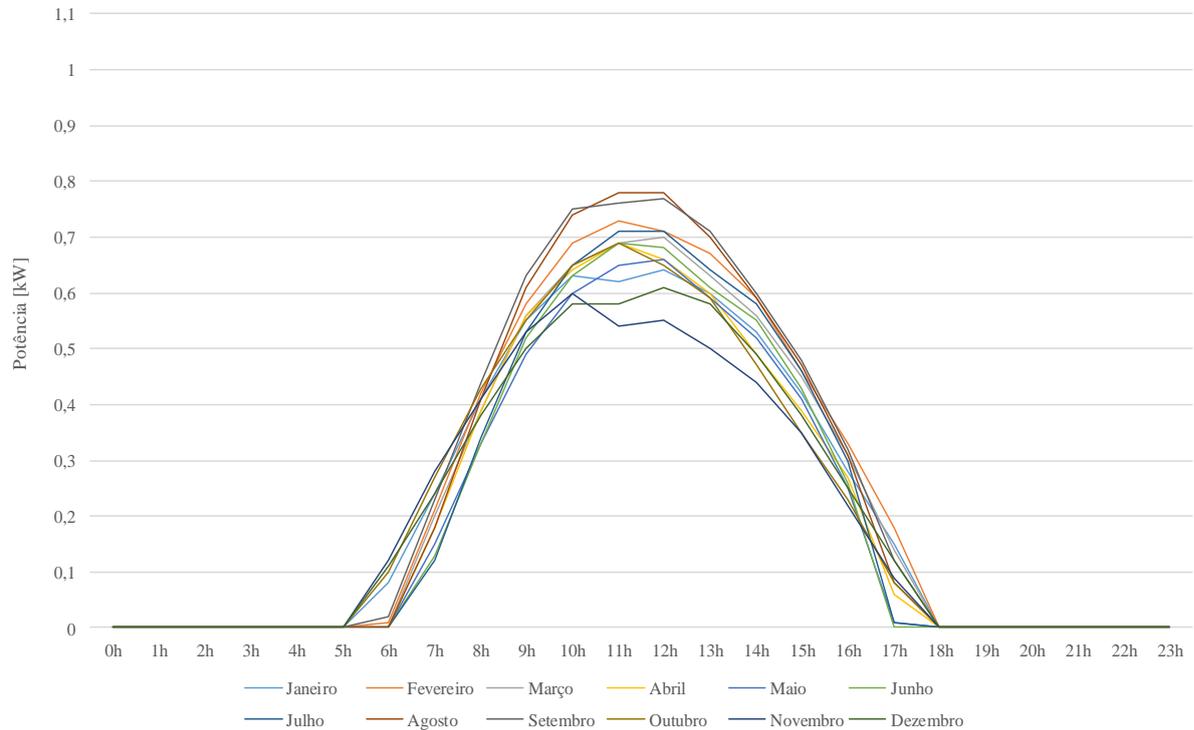
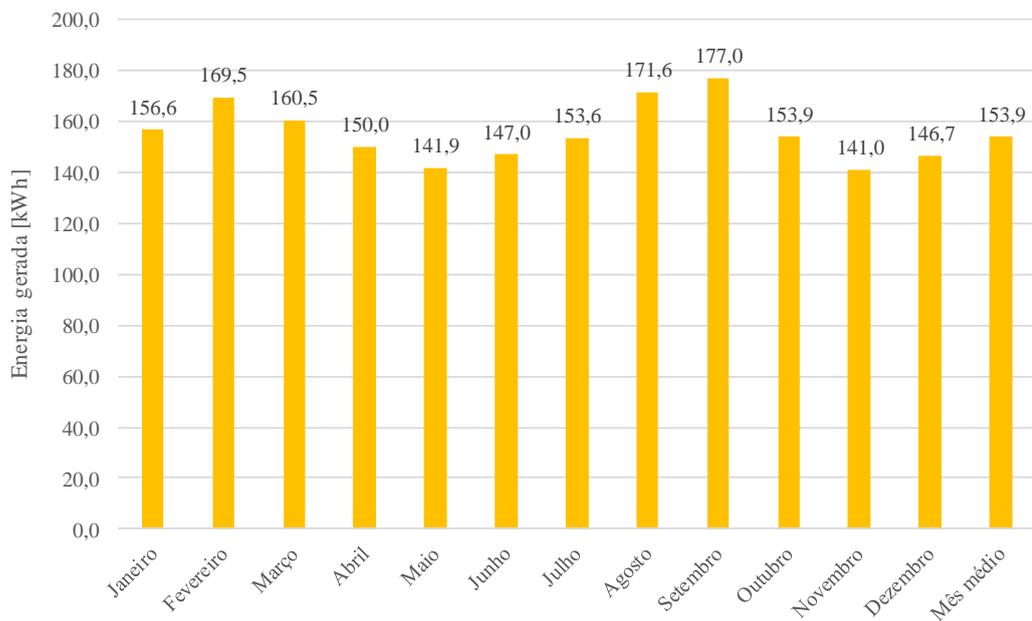


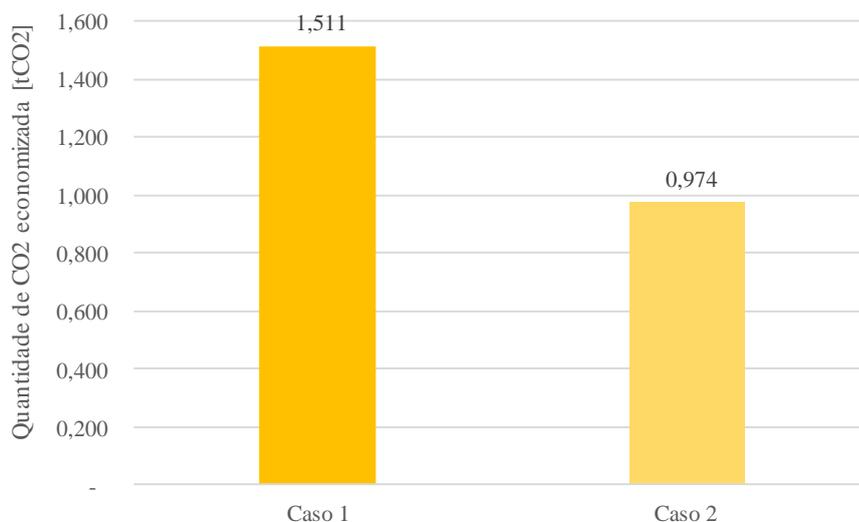
Gráfico 4.5 – Energia total gerada em cada mês – caso 2.



Finalmente, uma última coisa verificada com as simulações no PVSyst foram os resultados do chamado “balanço de carbono”. Ao utilizar essa ferramenta, é possível estimar quanto CO<sub>2</sub> deixa de ser emitido na atmosfera com a instalação do sistema fotovoltaico em questão. A estimativa considera que a produção de energia elétrica pelo SFV, que utiliza uma fonte limpa, vai substituir a mesma quantidade energia produzida de forma mais prejudicial ao

meio ambiente. Dessa forma, considerando a energia injetada na rede, o tempo de vida útil do sistema e a LCE, ou “Life Cycle Emission”, que é taxas de emissão de carbono por energia produzida (fornecidas pelo *software* automaticamente), obtiveram-se os resultados de balanço de carbono para cada caso apresentados no Gráfico 4.6.

Gráfico 4.6 – Balanços de carbono para os casos 1 e 2 estimados pelo PVSystem.



Observa-se dos valores obtidos que para o projeto de um SFV com as características dos casos avaliados e com um tempo de vida útil de 25 anos, o caso 1 economiza a emissão de 1,511 tCO<sub>2</sub> na atmosfera, enquanto o caso 2 economiza 0,974 tCO<sub>2</sub>. Ambos os resultados servem principalmente para ilustrar o impacto favorável que os investimentos em geração fotovoltaica geram no meio ambiente, o que vai de encontro à preocupação com as mudanças climáticas.

#### 4.1.9 Projeto Elétrico

Com o modelo dimensionado, as quantidades dos equipamentos e o arranjo entre eles definidos, foi feito o projeto elétrico do sistema. Foram representados os componentes do SFV e a sequência da ligação entre eles respeitando o arranjo anteriormente definido. Além disso, o projeto também apresenta o dimensionamento dos cabos condutores e o sistema de proteção atendendo aos requisitos da norma brasileira para instalações elétricas de baixa tensão, a ABNT NBR 5410:2004.

Para a interconexão entre os módulos, previu-se a utilização de cabos de 4mm<sup>2</sup> de seção. Pelo método de capacidade de corrente, verificou-se que esse cabo é capaz de conduzir até 32A

de corrente, valor que supera a corrente de curto-circuito dos módulos estabelecida em suas especificações técnicas ( $I_{sc} = 3,28A$ ), mesmo para o arranjo com *strings* em paralelo. Já de acordo com o método de queda de tensão, tem-se uma queda de tensão menor que 1% para o cabo escolhido, conforme recomendado.

No sistema de proteção, foram utilizados fusíveis e disjuntores de 15A. A inclusão de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e o dimensionamento dos demais componentes de proteção foram determinados em concordância com as normas.

A realização do projeto elétrico foi de especial importância para o caso 2, considerando que este é o caso referente ao modelo real que foi instalado na Faculdade de Tecnologia. Observa-se ainda os diferentes arranjos para cada caso determinados por meio de simulação – conforme mencionado no item anterior. Apresentam-se a seguir os diagramas do projeto elétrico da árvore solar fotovoltaica.

Figura 4.13 - Diagrama unifilar de interconexão dos módulos da árvore com o inversor – caso 1.

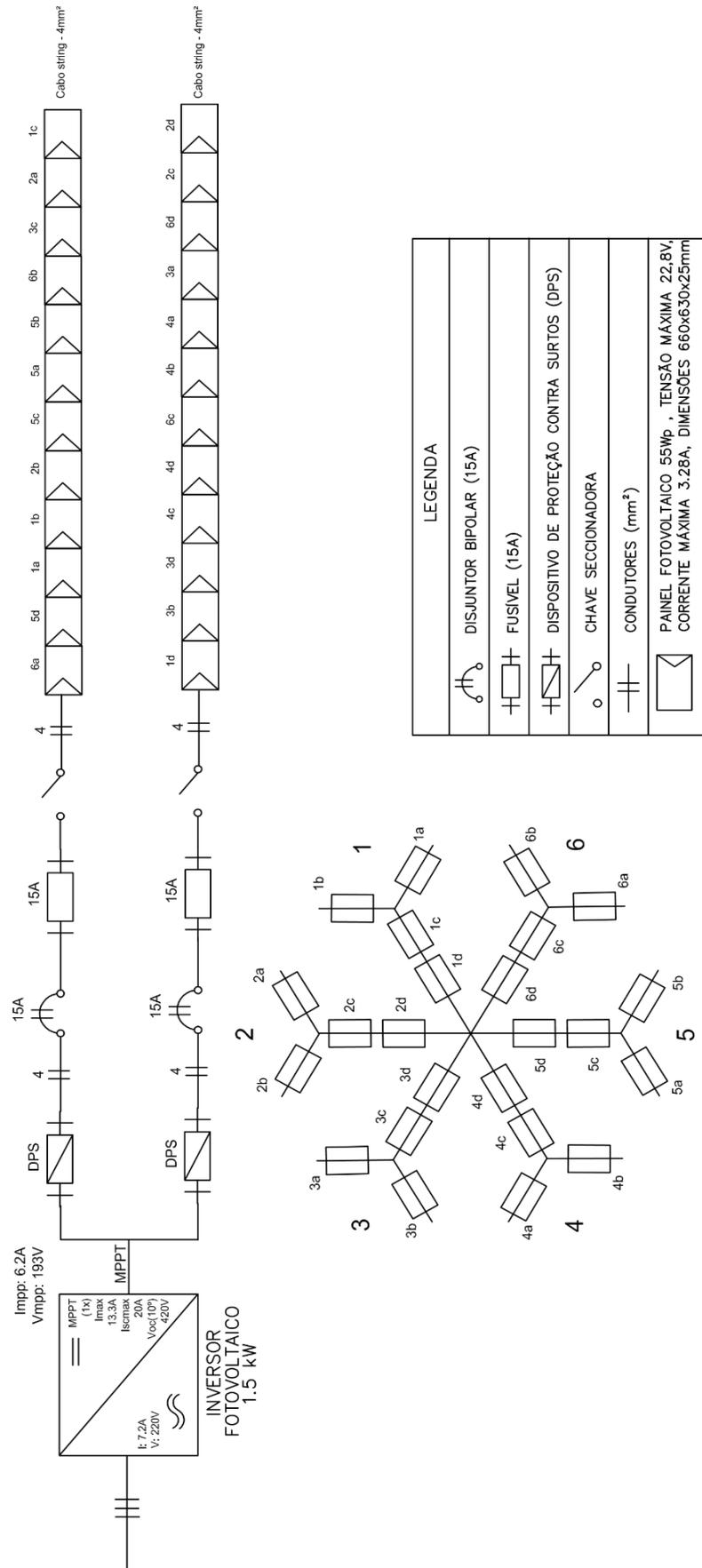
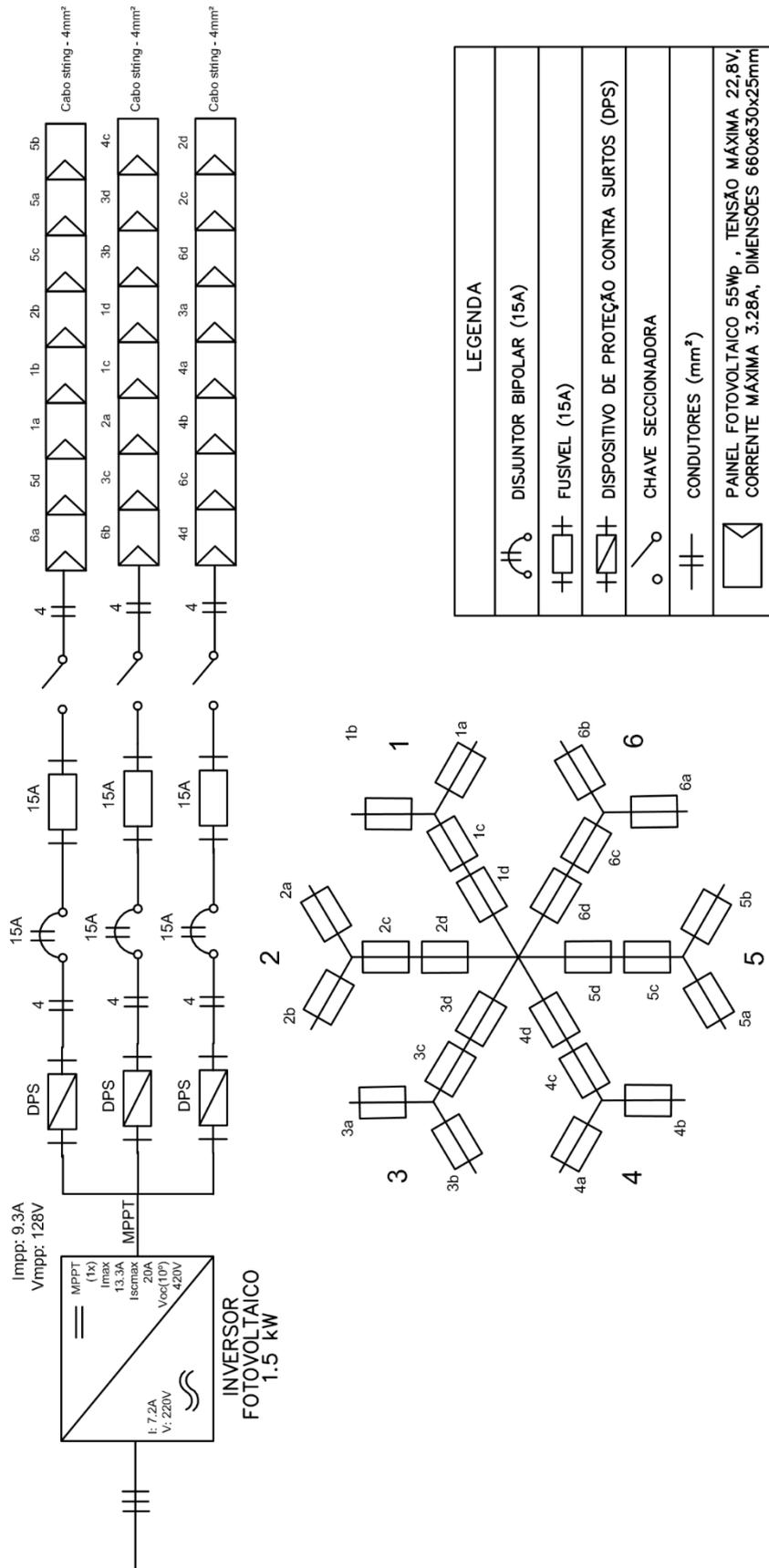


Figura 4.14 - Diagrama unifilar de interconexão dos módulos da árvore com o inversor – caso 2.



#### 4.1.10 Alocação de Cargas

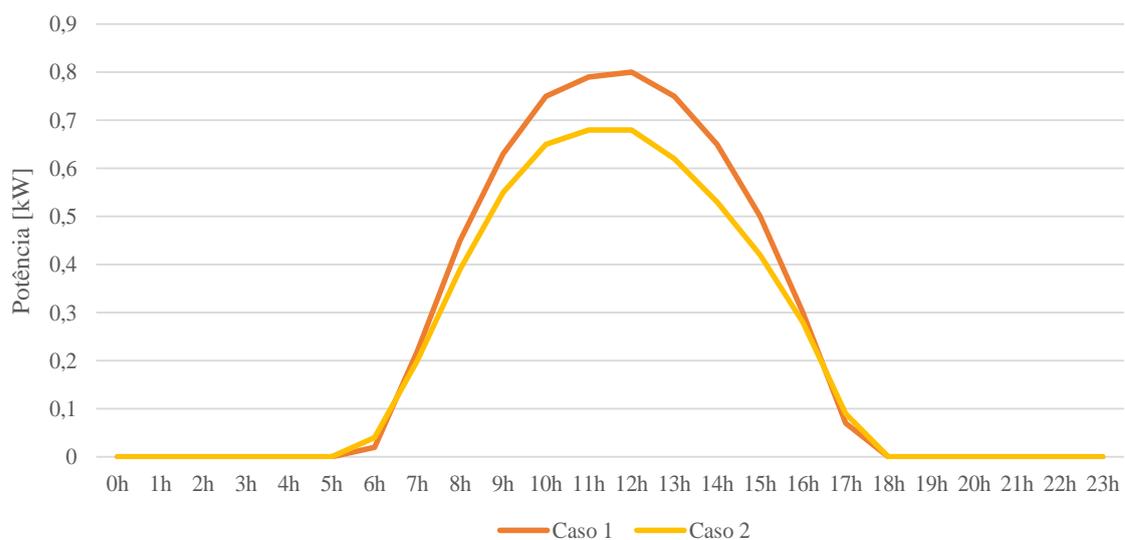
Com o intuito de avaliar a carga que o sistema da árvore será capaz de atender, foi feito um levantamento do consumo de energia de aparelhos e sistemas que pudessem aproveitar a energia solar fornecida pelo protótipo. Considerando que se trata de um SFV instalado na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, a previsão é que as cargas mais comuns sejam as referentes à iluminação e outras relativamente pequenas (como celulares e notebooks de alunos que circulam diariamente pelo local).

Há que se ressaltar, no entanto, que o dimensionamento da árvore solar fotovoltaica não foi feito de forma a atender uma demanda específica e não previu o armazenamento da energia para suprir o consumo em momentos sem geração. Logo, espera-se que a energia gerada pela árvore apenas atenda a uma parcela da demanda no prédio, de forma que não é possível determinar quais e quantas cargas específicas a árvore pode suprir.

Esta etapa do trabalho tem por objetivo apresentar as curvas de energia produzida em cada caso e levantar a quantidade de carga que a energia produzida pela árvore pode atender por dia (em um dia típico de geração).

Para esse levantamento, o primeiro passo foi verificar as curvas de potencial de geração fotovoltaica. Comparando os casos 1 e 2, para a média de um dia típico do ano, observa-se no Gráfico 4.7 uma geração maior no caso 1, embora o caso 2 apresente boas taxas também.

Gráfico 4.7 – Curvas de energia gerada em um dia médio do ano (casos 1 e 2).



Em seguida, a partir dos dados de geração de energia obtidos com o PVSyst, foi possível determinar o mês em que ela é menos significativa (mês crítico), o mês em que a geração é maior e a média mensal para então comparar os valores de cada caso (Gráficos 4.8 e 4.9).

Gráfico 4.8 – Curvas de energia gerada em um dia para melhor mês, mês crítico e mês médio (caso 1).

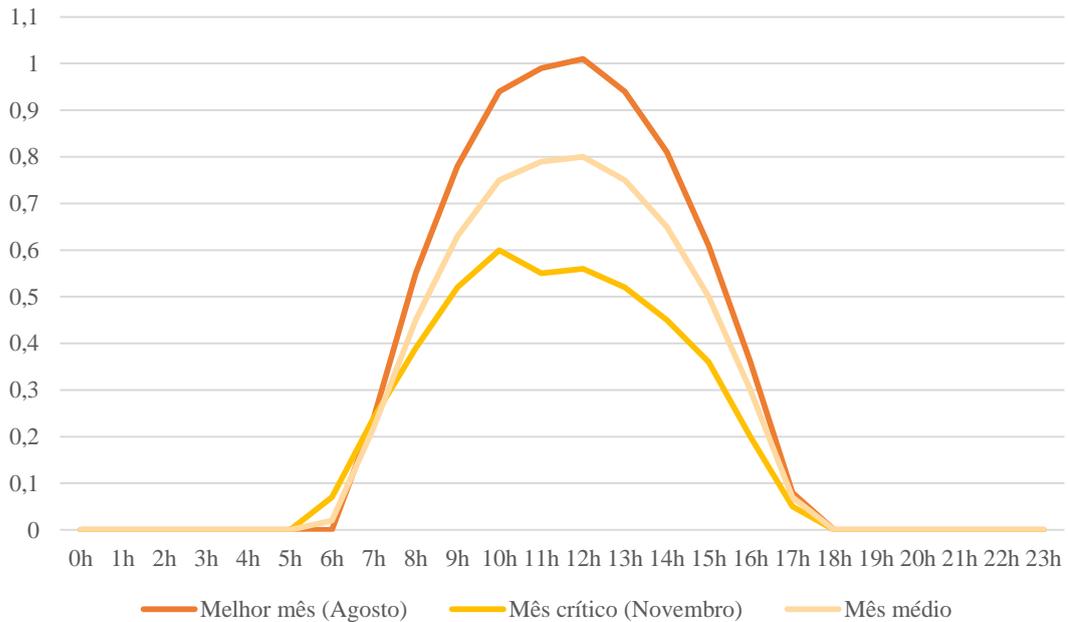
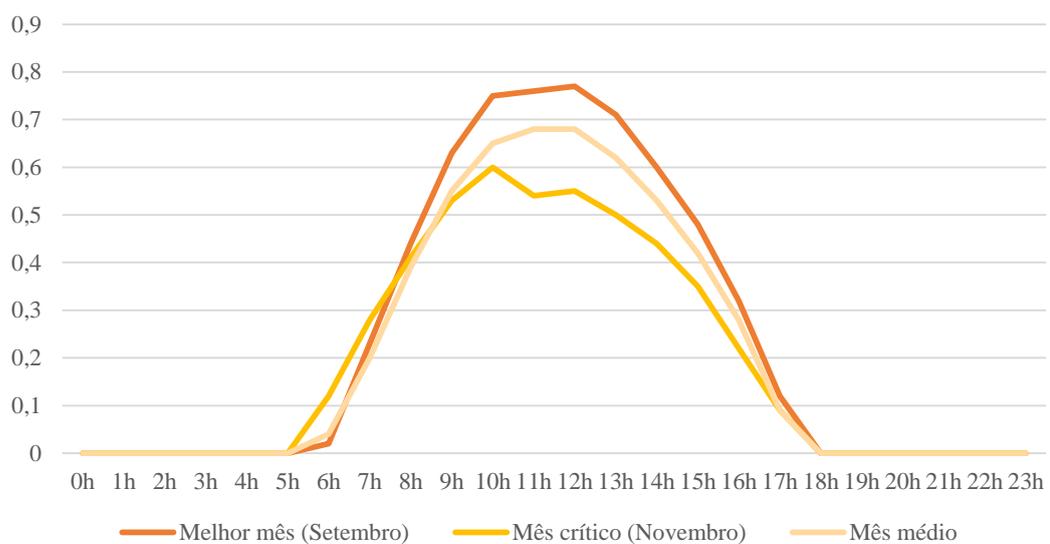


Gráfico 4.9 – Curvas de energia gerada em um dia para melhor mês, mês crítico e mês médio (caso 2).



Verificaram-se então as potências das principais cargas avaliadas pelo levantamento que podem vir a ser supridas pelo sistema da árvore solar. Apenas a título de ilustração, apresenta-se na Tabela 4.9 as cargas consideradas.

*Tabela 4.9 – Cargas consideradas no levantamento e suas respectivas potências.*

Aparelhos	Potência [W]
<b>Carregador de celular</b>	1,5
<b>Notebook</b>	20
<b>Computador</b>	63
<b>Modem de internet</b>	8
<b>Lâmpada fluorescente compacta - 14 W</b>	14
<b>Lâmpada fluorescente compacta - 20 W</b>	20
<b>Lâmpada fluorescente compacta - 28 W</b>	28
<b>Lâmpada fluorescente compacta - 32 W</b>	32
<b>Lâmpada fluorescente compacta - 40 W</b>	40

*Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL - CRESESB, 2014.*

A realidade da situação analisada, no entanto, não representa um consumo típico destes tipos de aparelhos e cargas. A situação avaliada, isto é, a demanda da FT, mostra-se diferenciada nos seguintes aspectos: diariamente, existe uma grande circulação de pessoas que podem vir a querer carregar seus aparelhos eletrônicos no prédio, existem aulas em salas e laboratórios de computadores (os quais podem ficar ligados por muitas horas), a iluminação é necessária nas salas mesmo durante o dia, dentre outros.

É importante observar então que se optou por fazer uma análise quantitativa da demanda atendida pela árvore solar de forma independente para cada uma das cargas previstas devido à dificuldade de se determinar com precisão a demanda real dessas cargas por hora e durante um dia.

Como o caso 2 representa o modelo real da árvore por ter sido o modelo instalado na Faculdade de Tecnologia da UnB, decidiu-se por representar nesta seção o levantamento de alocação de cargas na energia gerada por esse caso em um dia médio do ano. Os resultados podem ser verificados na Tabela 4.10 a seguir.

Tabela 4.10 – Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de um mês médio – caso 2.

Aparelhos	Potência (kW)	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
<b>Energia Injetada na rede</b>	-	0,02	0,22	0,45	0,63	0,75	0,79	0,8	0,75	0,65	0,5	0,3	0,07
celular	0,0015	13,3	146	300	420	500	526	533	500	433	333	200	46,7
notebook	0,02	1	11	22,5	31,5	37,5	39,5	40	37,5	32,5	25	15	3,5
computador	0,063	0,32	3,49	7,14	10	11,9	12,5	12,7	11,9	10,3	7,94	4,76	1,11
modem	0,008	2,50	27,5	56,3	78,8	93,8	98,8	100	93,8	81,3	62,5	37,5	8,75
lâmpadas 14W	0,014	1,43	15,7	32,1	45	53,6	56,4	57,1	53,6	46,4	35,7	21,4	5
lâmpadas 20W	0,02	1	11	22,5	31,5	37,5	39,5	40	37,5	32,5	25	15	3,5
lâmpadas 28W	0,028	0,71	7,86	16,1	22,5	26,8	28,2	28,6	26,8	23,2	17,9	10,7	2,5
lâmpadas 32W	0,032	0,63	6,88	14,1	19,7	23,4	24,7	25	23,4	20,3	15,6	9,37	2,19
lâmpadas 40W	0,04	0,5	5,5	11,3	15,8	18,8	19,8	20	18,8	16,3	12,5	7,5	1,75

Os levantamentos realizados para o dia típico do caso 1 e para o melhor mês e o mês crítico de ambos os casos podem encontrados ao final do texto, na seção de apêndices e seus resultados podem ser comparados com relação a uma maior ou menor alocação de cargas na energia gerada.

Cabe observar ainda que o armazenamento, apesar de não previsto neste projeto, pode vir a ser uma alternativa futuramente, pois apresenta a vantagem de promover um equilíbrio no fluxo de energia ao longo do tempo na medida em que expurga os picos de potência referentes a geração e demanda (CRESESB, 2014). Com isso, seria possível que, eventualmente, a energia gerada com a árvore fosse usada diretamente pela comunidade de alunos, funcionários ou quaisquer outros frequentadores do espaço da FT mesmo fora dos períodos de geração ou que pudessem ser instaladas tomadas e saídas USB para carregar aparelhos no local.

Além disso, verifica-se a possibilidade futura de levantar mais precisamente e de forma a discriminar os tipos de carga (principalmente nos circuitos de iluminação) da FT para que seja possível determinar quanto do consumo do prédio depende da energia solar.

## 4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA

### 4.2.1 Levantamento do investimento inicial

Com os valores dos componentes do sistema, do material utilizado na construção do protótipo e dos serviços realizados para a confecção e a implementação da árvore é possível estimar o custo inicial do projeto nos casos em estudo.

Considerou-se o mesmo investimento inicial para os dois casos, embora apenas o caso 2 esteja sendo implementado. As tabelas a seguir representam a divisão do custo total em componentes do SFV (Tabela 4.11), material de alvenaria para construção da base (Tabela 4.12) e serviços realizados na construção e na instalação do projeto (Tabela 4.13). Já os gráficos trazem seus respectivos custos percentuais. Por fim, apresentam-se, na Tabela 4.14 e no Gráfico 4.13, os custos totais e em percentual do projeto.

Cabe mencionar que os preços dos componentes e dos materiais nas tabelas seguiram valores baseados em pesquisa de mercado. Já na tabela de serviços, os valores atribuídos têm base em contratos firmados entre a Fundação Universidade de Brasília (FUB) e empresas de serviços terceirizados, que podem ser consultados no portal da UnB.

*Tabela 4.11 – Custos dos componentes do SFV.*

<b>Componentes do SFV -1320 Wp</b>				
<b>Tipo de material</b>	<b>Preço por unidade [R\$]</b>	<b>Unidades</b>	<b>TOTAL [R\$]</b>	<b>Custos %</b>
<b>Módulos</b>	250,00	24	6.000,00	44,64%
<b>Inversor</b>	6.500,00	1	6.500,00	48,36%
<b>Cabos (100m)</b>	110,00	4	440,00	3,27%
<b>Conectores (par)</b>	6,00	44	264,00	1,96%
<b>Conectores multibranch</b>	30,00	4	120,00	0,89%
<b>Disjuntores</b>	15,00	4	60,00	0,45%
<b>Fusíveis</b>	1,50	4	6,00	0,04%
<b>DPS</b>	25,00	2	50,00	0,37%
<b>TOTAL</b>			13.440,00	100,00%
<b>Custo (R\$/kWp)</b>				<b>10,18</b>

Gráfico 4.10 – Custos percentuais dos componentes do SFV.

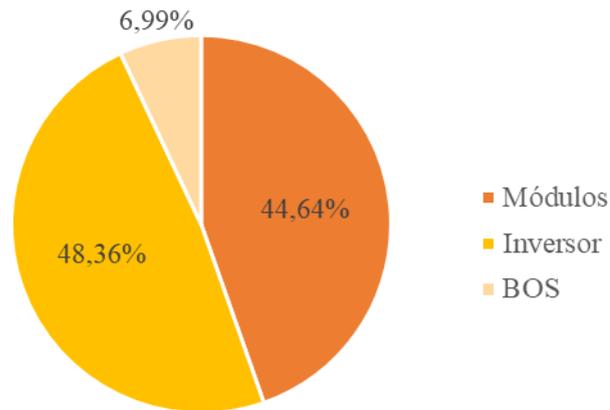


Tabela 4.12 – Custos dos materiais de construção da base.

Materiais de construção				
Tipo de material	Preço por unidade	Unidades	TOTAL	Custos %
Cimento (sacos)	R\$ 20,00	6	R\$ 120,00	51,06%
Tijolos (qtd)	R\$ 0,50	100	R\$ 50,00	21,28%
Brita (m <sup>3</sup> )	R\$ 90,00	0,5	R\$ 45,00	19,15%
Areia (m <sup>3</sup> )	R\$ 90,00	1	R\$ 90,00	38,30%
Malha de ferro (m <sup>2</sup> )	R\$ 4,00	12,5	R\$ 50,00	21,28%
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 235,00</b>	<b>100,00%</b>

Gráfico 4.11 – Custos percentuais dos materiais de construção da base.

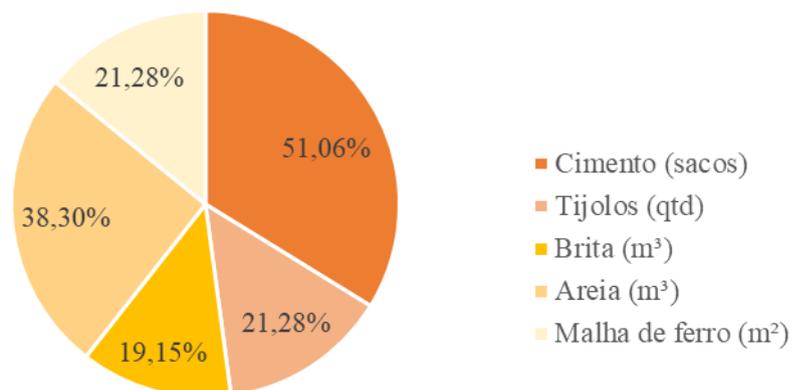


Tabela 4.13 – Custos dos serviços de construção e instalação do projeto.

Serviços de construção e instalação					
Tipo de serviço	Custo da hora trabalhada [R\$]	Horas trabalhadas	Quantidade de funcionários	TOTAL [R\$]	Custos %
Alvenaria	10,00	120	1	1.200,00	16,04%
Ajudante	5,10	120	2	1.224,00	16,37%
Serralheiro	13,80	120	2	3.312,00	44,28%
Carpinteiro	13,80	24	1	331,20	4,43%
Eletricista	12,00	40	2	960,00	12,84%
Encarregado geral	11,30	40	1	452,00	6,04%
<b>TOTAL</b>				<b>7.479,20</b>	<b>100,00%</b>

Gráfico 4.12 – Custos percentuais dos serviços de construção e instalação do projeto.

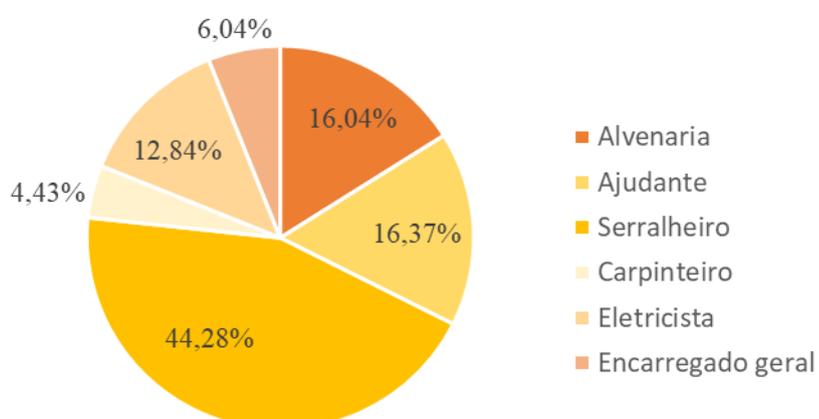
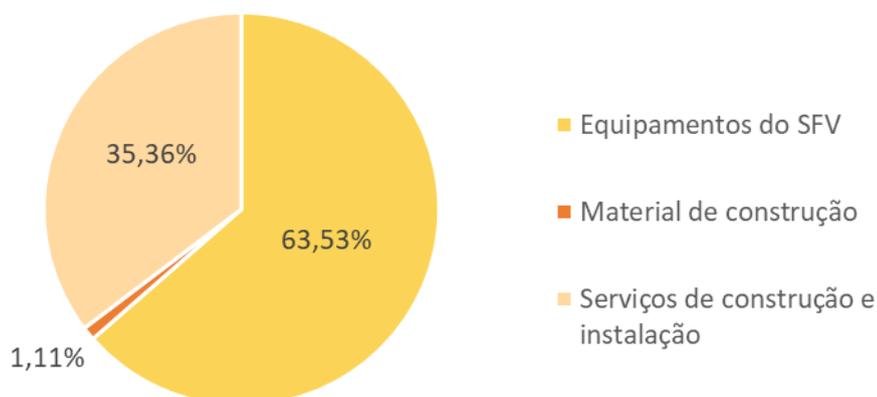


Tabela 4.14 – Custos totais do projeto.

Custos Totais R\$	
Equipamentos do SFV	13.440,00
Material de construção	235,00
Serviços de construção e instalação	7.479,20
<b>TOTAL</b>	<b>21.154,20</b>
<b>Custo (R\$/kWp)</b>	<b>16,03</b>

Gráfico 4.13 – Custos percentuais do projeto.



Avalia-se então que o valor do investimento inicial total para o projeto da árvore solar fotovoltaica instalada na FT, foi de R\$ 21.154,20. Já os gastos do projeto traduzidos no custo final da potência que o SFV é capaz de produzir em condições nominais resultaram em R\$ 16,03 por kWp.

#### 4.2.2 Impacto econômico da geração solar no consumo energético

O consumo energético da UnB foi determinado a partir da avaliação de alguns aspectos. O primeiro diz respeito ao fato de que, dentre os grupos tarifários considerados pela Companhia Elétrica de Brasília (CEB), a UnB encontra-se enquadrada no grupo A4 - Poder Público, atendido em alta tensão (na faixa de 2,3 a 25 kV). Outro aspecto é que a UnB não possui uma conta de luz que discrimine o consumo de cada um de seus prédios, sendo necessário então avaliar conjuntamente o consumo de uma parcela dos prédios da universidade na qual a FT está incluída.

É necessário mencionar, ainda, que será utilizada, apenas para efeito de comparação, uma conta de energia com valores relativos ao mês de junho do ano de 2016. Portanto, devido à limitação de dados precisos e efetivos, foram considerados tais os valores como forma de apresentar um recorte dos parâmetros em uma situação real. A partir da conta de energia avaliada, foi possível verificar o valor cobrado e o consumo do mês para determinar o custo da tarifa. Dessa forma, o valor de tarifa por kWh do grupo A4 utilizado nesta análise pode ser verificado na Tabela 4.15 a seguir.

Tabela 4.15 – Tarifa de energia para a UnB no período de Junho de 2016.

<b>Tarifa para o mês de junho de 2016</b>	
<b>Consumo na ponta</b>	197.076
<b>Consumo fora da ponta</b>	1.785.214
<b>Valor cobrado na conta de Jun/2016</b>	1.022.631,37
<b>Valor da Tarifa [R\$/kWh]</b>	<b>0,52</b>

Faz-se necessário observar que tal valor de tarifa obtido serve apenas como uma referência e que mais dados seriam necessários para uma análise mais precisa. Isso é justificado pelo fato existirem diversos ajustes que são realizados na tarifa, tanto os devidos ao processo de revisão tarifária realizado pela Aneel quanto os relacionados à existência das chamadas bandeiras tarifárias, que realizam uma compensação na tarifa relativa ao custo da geração de energia naquele período. Todos esses fatores (e os dados específicos de cada mês) devem então ser considerados em uma análise econômica mais profunda.

No caso deste trabalho, verificou-se que a bandeira tarifária vigente no mês considerado (junho de 2016) era verde, ou seja, as condições de geração de energia eram favoráveis e, portanto, não houve acréscimo na conta.

Assim, elaboram-se as seguintes tabelas (Tabelas 4.16 e 4.17) com os principais parâmetros que compõem que permitem avaliar o impacto econômico da geração fotovoltaica em cada caso para o período em questão.

Tabela 4.16 – Parâmetros calculados para o caso 1.

<b>SFV 1320 Wp – caso 1</b>	
Consumo total do período avaliado no conjunto de prédios que inclui a FT (kWh/mês)	1.982.290
Geração do Arranjo no período (kWh)	209,2
Investimento inicial (R\$)	R\$ 21.154,20
Tarifa relativa do período avaliado (R\$/kWh)	R\$ 0,52
<b>Economia devido à geração pelo SFV no período (R\$)</b>	<b>R\$ 108,78</b>

Tabela 4.17 – Parâmetros calculados para o caso 2.

<b>SFV 1320 Wp – caso 2</b>	
Consumo total do período avaliado no conjunto de prédios que inclui a FT [kWh/mês]	1.982.290
Geração do Arranjo no período [kWh]	147,0
Investimento inicial [R\$]	R\$ 21.154,20
Tarifa relativa do período avaliado [R\$/kWh]	R\$ 0,52
<b>Economia devido à geração pelo SFV no período [R\$]</b>	<b>R\$ 76,44</b>

A análise da economia oferecida pelos arranjos dos SFVs em estudo encontra fundamento no fato de que foi considerado um mês típico e a sua tarifa vigente. Verifica-se ainda que extrapolar os resultados desse mês para o resto do ano, para um cenário mais conservador que dispensa as possíveis variações de tarifa, ainda confere validade ao modelo de análise. Isso se mostra coerente principalmente ao avaliar o histórico das bandeiras tarifárias durante os meses do mesmo período, como mostra a Tabela 4.18 a seguir.

Tabela 4.18 – Histórico das bandeiras tarifárias vigentes no período em estudo.

<b>Mês/ano</b>	<b>Bandeira tarifária vigente</b>
<b>Abr/16</b>	Verde
<b>Mai/16</b>	Verde
<b>Jun/16</b>	Verde
<b>Jul/16</b>	Verde
<b>Ago/16</b>	Verde
<b>Set/16</b>	Verde
<b>Out/16</b>	Verde
<b>Nov/16</b>	Amarela
<b>Dez/16</b>	Verde
<b>jan/17</b>	Verde
<b>Fev/17</b>	Verde

Fonte: Aneel – Relatório do acionamento das bandeiras tarifárias. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br) – Acesso em: 30/11/2017.

No Apêndice, contudo, é possível conferir os cálculos baseados na tarifa de junho de 2016 com os acréscimos relativos às bandeiras acionadas nos meses mais recentes. Aplicando as novas tarifas à geração específica do arranjo a cada mês, estima-se a economia na conta de forma mais detalhada.

Cabe frisar ainda que mais do que economizar nos gastos com consumo energético, o projeto tem por objetivo promover o uso de energia solar e, estando dentro da universidade, pode também incentivar os estudos necessários para desenvolver o protótipo e as tecnologias nele envolvidas.

### **4.2.3 Elaboração do fluxo de caixa**

Conforme dito anteriormente, para uma avaliação mais profunda, no entanto, seria necessário realizar o fluxo de caixa completo do projeto da árvore solar da FT, considerando outros fatores precisariam ser acrescentados à análise como os reajustes tarifários anuais e o valor para uma taxa mínima de atratividade para o investimento. Esta última pode ser equivalente à chamada Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP), um índice estipulado pelo BNDES para avaliar o retorno de investimentos em infraestrutura no país. Seu valor é dado em percentual ao ano [% a.a.] e é reajustado a cada três meses com base na meta de inflação e no prêmio de risco.

Faz-se necessário também adicionar os gastos com a manutenção do sistema que incluem a limpeza dos painéis e, eventualmente, a substituição de componentes como cabos, conectores, disjuntores, entre outros. Avalia-se que estes últimos representam um valor de 1% do investimento inicial do projeto.

A análise ainda considera, eventualmente, a despesa com a troca do inversor, já que sua vida útil corresponde aproximadamente à metade da duração do gerador fotovoltaico, cerca de 10 a 15 anos, enquanto os módulos no gerador podem durar cerca de 25 anos com eficiência acima de 80%. Além disso, a receita anual gerada pelo projeto teria que ser ajustada considerando a queda de eficiência dos painéis e, conseqüentemente, na economia devido à geração fotovoltaica.

As tabelas a seguir apresentam, primeiramente, os parâmetros considerados para a elaboração do fluxo de caixa para o estudo de caso em questão e, em seguida, os próprios valores do fluxo do projeto da árvore solar.

Tabela 4.19 – Parâmetros para elaboração do fluxo de caixa – caso 2.

SFV do Caso 2	
Geração do arranjo no ano 1 [kWh]	1869
Tarifa do período [R\$/kWh]	0,52
Economia devido à geração pelo SFV no ano 1 [R\$]	964,19
Investimento inicial [R\$]	21.154,20
Custo anual de operação e manutenção [R\$]	211,54
Custo da troca do inversor no ano 13 [R\$]	6.500
Queda anual da eficiência dos painéis [%]	0,80
TMA [%]	7,5
Tempo de vida útil do projeto [anos]	25

Tabela 4.20 – Fluxo de caixa – caso 2 (parte 1)

Ano	1	2	3	4	5	6
Investimento inicial (R\$)	-21154,20					
Economia anual (R\$)		964,19	956,47	948,82	941,23	933,70
Gastos com manutenção (R\$)		-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54
Troca do inversor (R\$)						
Fluxo de caixa (R\$)	-21154,20	752,65	744,93	737,28	729,69	722,16
VPL (R\$)	-21154,20	700,14	692,96	685,84	678,78	671,78
VPL acumulado (R\$)	-21154,20	-20454,06	-19761,10	-19075,26	-18396,48	-17724,70

Tabela 4.21 – Fluxo de caixa – caso 2 (parte 2)

Ano	7	8	9	10	11	12
Investimento inicial (R\$)						
Economia anual (R\$)	926,23	918,82	911,47	904,18	896,95	889,77
Gastos com manutenção (R\$)	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54
Troca do inversor (R\$)						
Fluxo de caixa (R\$)	714,69	707,28	699,93	692,64	685,41	678,23
VPL (R\$)	664,83	657,94	651,10	644,32	637,59	630,91
VPL acumulado (R\$)	-17059,87	-16401,93	-15750,83	-15106,52	-14468,93	-13838,02

Tabela 4.22 – Fluxo de caixa – caso 2 (parte 3)

Ano	13	14	15	16	17	18
Investimento inicial (R\$)						
Economia anual (R\$)	882,65	875,59	868,59	861,64	854,74	847,91
Gastos com manutenção (R\$)	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54
Troca do inversor (R\$)	-6500,00					
Fluxo de caixa (R\$)	-5828,89	664,05	657,05	650,10	643,20	636,37
VPL (R\$)	-5422,22	617,72	611,21	604,74	598,33	591,97
VPL acumulado (R\$)	-19260,24	-18642,52	-18031,31	-17426,57	-16828,24	-16236,27

Tabela 4.23 – Fluxo de caixa – caso 2 (parte 4)

Ano	19	20	21	22	23	24	25
Investimento inicial (R\$)							
Economia anual (R\$)	841,12	834,39	827,72	821,10	814,53	808,01	801,55
Gastos com manutenção (R\$)	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54	-211,54
Troca do inversor (R\$)							
Fluxo de caixa (R\$)	629,58	622,85	616,18	609,56	602,99	596,47	590,01
VPL (R\$)	585,66	579,40	573,19	567,03	560,92	554,86	548,84
VPL acumulado (R\$)	-15650,61	-15071,21	-14498,02	-13930,99	-13370,07	-12815,22	-12266,37

#### 4.2.4 Análise de viabilidade econômica

A partir dos resultados obtidos com o fluxo de caixa apresentado anteriormente, é possível verificar a viabilidade econômica do projeto da árvore solar instalada na FT. Conforme mencionado, os cálculos levaram em consideração os custos de manutenção e operação, a queda de eficiência dos painéis, a troca do inversor e uma TMA equivalente à Taxa de Juros de Longo Prazo para atualizar o valor do projeto para o presente (VPL).

Dos resultados, o que chama a atenção é o valor encontrado para o VPL, um total de R\$ -12.266,37. Com um VPL negativo, como o do caso em questão, significa que o projeto não se paga ao longo de sua vida útil e que, conseqüentemente, a árvore solar não gera uma economia na conta de luz capaz de cobrir os gastos com a sua implementação.

Mais do que isso, é possível verificar que o protótipo, tal como foi concebido e implementado, não é capaz de trazer um retorno financeiro pois mal cobre os gastos com a troca do inversor na metade de seu tempo de vida. De acordo com os valores do fluxo de caixa, a árvore solar leva cerca de 11 anos, ou seja, quase o tempo de vida útil do inversor, para retornar o valor gasto com a troca deste (sendo que ainda restam os gastos com o restante dos componentes, materiais e mão-de-obra, além dos gastos anuais com manutenção). Isso leva à conclusão de que para fins desta análise, não é viável sequer calcular o tempo de *payback* do projeto, que seria longo demais e impraticável na realidade em que um sistema fotovoltaico está inserido.

Por fim, pode-se dizer que, apesar desta análise econômica preliminar concluir que o projeto não é tão viável, uma vez que a árvore se encontre em operação e que dados mais precisos, e em maior volume, das contas de energia, do consumo da FT e das taxas de juros possam ser obtidos, seria interessante determinar o fluxo de caixa do projeto e verificar valores mais exatos de índices como o Valor Presente Líquido (VPL), Tempo de Interna de Retorno (TIR) e Valor de *Payback* para, dessa forma, entender melhor como o protótipo da árvore solar poderia vir a ser mais rentável futuramente.

### **4.3 Considerações finais do capítulo**

O capítulo em questão apresentou os principais resultados obtidos ao longo de todas as etapas do trabalho, das análises técnica e econômica, à implementação de fato do projeto da Árvore Solar da Faculdade de Tecnologia.

A análise técnica incluiu as etapas de avaliação do recurso solar, localização do projeto, modelagem tridimensional, estudo de sombreamento, definição do arranjo, dimensionamento do sistema, simulação de operação e projeto elétrico. Além disso foi realizado um estudo da alocação de cargas na energia gerada. Já na análise econômica, foram feitos o levantamento dos preços dos componentes e gastos com a instalação, avaliação do investimento inicial e do impacto da economia na conta de energia.

Foi possível então discutir os resultados de cada etapa e concluir que no local de instalação da árvore, as taxas de irradiação solar são bastante relevantes e o sombreamento não prejudica os períodos de maior geração de energia. No dimensionamento do sistema e a definição das configurações dos casos 1 e 2, vários aspectos precisaram ser considerados e ajustes devidos às limitações de projeto, da ferramenta de simulação e dos recursos empregados precisaram ser feitos. Além disso uma metodologia para a definição do arranjo do SFV no caso

2 (modelo real) foi elaborada para que fosse possível atingir o melhor aproveitamento de geração no sistema.

Outros resultados importantes foram a descrição das etapas de construção e implementação do protótipo. Foi possível verificar que, embora a maior parte das etapas tenha sido concluída, a burocracia no andamento de processos no setor público atrasou a finalização do projeto e a instalação da parte elétrica ainda se encontra pendente.

Ainda assim, foi possível determinar, a partir das simulações de operação do sistema que o modelo do caso 1 é de fato mais eficiente no que diz respeito à capacidade de geração, apresentando um resultado de 2168,0 kWh/ano, cerca de 13,78% mais do que a quantidade de energia gerada no caso 2, que é de 1869,2 kWh/ano.

Já quanto aos resultados da análise econômica, determinou-se que o investimento inicial total para o projeto da árvore solar da FT, foi de R\$ 21.154,20 e o preço do kWp, calculado para condições nominais, foi igual a R\$ 16,03. Reitera-se que os gastos com o projeto foram considerados os mesmos para os dois casos em estudo.

Finalmente, em uma análise da economia proporcionada pela geração de energia pelo SFV da árvore solar, verificou-se que o caso 1 oferece uma economia mensal de R\$ 108,78, enquanto que no caso 2, a economia calculada foi de R\$ 76,44.

Na implementação deste projeto, verificou-se, especialmente com a elaboração do fluxo de caixa, que ele ainda se mostra pouco viável economicamente. A tendência, no entanto, é que essa situação possa ser revertida, principalmente pelo fato de que os componentes do sistema vêm apresentando queda em seus preços ao longo dos anos. Avaliando ainda as possibilidades de economia no investimento inicial do projeto, além de economizar com o material usado na estrutura (o que foi feito com o reaproveitamento de postes de iluminação antigos), têm-se as seguintes sugestões:

- Desenvolver uma estrutura de base para a árvore que seja mais simples e que substitua os gastos com alvenaria e mão de obra;

Transformar o protótipo em uma peça de mobiliário a exemplo do que já existe no mercado, apresentaria muitas vantagens nesse sentido, pois poderia empregar menos mão de obra na instalação e a utilizar de materiais mais baratos.

No projeto implementado nesse trabalho houve a necessidade de construir toda uma base concretada para permitir que a árvore fosse melhor integrada ao local, o qual era um jardim originalmente. Em outra situação, a fundação com tubulão e um assento de madeira poderiam ser suficientes.

- Utilizar um inversor de potência mais próxima da potência nominal de geração do arranjo fotovoltaico;

Conforme anteriormente mencionado, o inversor neste projeto foi um pouco superdimensionado, o que fez com que seu custo fosse maior. Para economizar com os componentes do projeto, é importante que o dimensionamento seja bem criterioso e avalie possibilidades que incluam projetar o gerador com uma potência nominal até 10% maior que a do inversor. Além disso, o arranjo do gerador pode ser dimensionado com painéis de maior potência que, apesar de mais caros, podem ser usados em menor quantidade e isso poderia proporcionar mais economia dos gastos com o investimento inicial.

## 5 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar o projeto de um sistema fotovoltaico na forma de uma árvore solar e avaliar técnica e economicamente a sua realização na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

A elaboração e a execução de um projeto de aproveitamento de uma fonte de energia renovável como a solar vem ao encontro de propostas que têm tomado um espaço cada vez maior na sociedade, não apenas em termos de protótipos para estudo do emprego das tecnologias nestes projetos, mas também em termos do lançamento de produtos derivados do desenvolvimento delas. Isso quer dizer que a realização de um projeto como o SFV, proposto neste trabalho, é uma forma de incentivar que sejam feitos cada vez mais trabalhos e estudos no sentido de melhorar a tecnologia do aproveitamento das fontes renováveis, de apresentar propostas de integração de sistemas de micro e minigeração a áreas urbanas, de tornar a energia gerada por esses sistemas mais acessível e viável, além de promover os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Com a possibilidade de projetar SFVs com arquiteturas diferentes do que é feito tradicionalmente na paisagem urbana, em que se costumam utilizar telhados e fachadas de prédios, verificam-se algumas das vantagens que se obtêm com inovações no *design* de um sistema de geração solar, como a riqueza estética e a economia de espaço. Uma conclusão do trabalho sobre o *design* de uma árvore solar foi que, ao analisar dois casos que diferem entre si apenas no que diz respeito à orientação dos painéis e a curvatura dos galhos, é possível obter modelos com maior ou menor eficiência na medida em que seu *design* é mais reto ou mais orgânico e parecido com uma árvore. Entretanto, ainda que um *design* mais orgânico possa vir a prejudicar o desempenho do sistema, tal como se verificou com as simulações desse trabalho, acredita-se ser possível buscar um equilíbrio de forma e capacidade de geração.

A estrutura da Árvore Solar da FT, tal como foi elaborada em trabalhos anteriores, apresenta seis “galhos” com quatro painéis em cada um deles. Este modelo arquitetônico teórico elaborado na fase de concepção da árvore solar, nos trabalhos anteriores a sua construção correspondeu nesse estudo ao modelo do caso 1. Nele os “galhos” foram dispostos em um mesmo plano horizontal e os painéis poderiam ser ajustados para apresentar a mesma orientação.

O caso 2, por outro lado, considerou o arranjo final da árvore, a estrutura do protótipo construído e montado. As diferenças desse arranjo em relação ao modelo teórico do caso 1 foram relacionadas apenas aos ângulos das orientações (inclinação e azimute) dos painéis e à

curvatura dos “galhos”, características que deram à árvore um *design* mais orgânico.

Seguindo a revisão da bibliografia relacionada ao tema, no capítulo 3, verificaram-se os materiais e os métodos empregados nesse estudo para avaliar os aspectos do projeto e da implementação da árvore solar fotovoltaica na Faculdade de Tecnologia, assim como a eficiência e o desempenho do sistema.

A análise técnica incluiu as etapas de avaliação do recurso solar, localização do projeto, modelagem tridimensional, estudo de sombreamento, definição do arranjo, dimensionamento do sistema, simulação de operação e projeto elétrico. Já na análise econômica, foram feitos o levantamento dos preços dos componentes e gastos com a instalação, avaliação do investimento inicial e cálculo do impacto da geração do SFV no consumo do prédio.

No capítulo seguinte, em que se discutiram os resultados da aplicação das metodologias, concluiu-se, primeiramente, que o local determinado para a instalação do protótipo, no que diz respeito ao recurso solar e ao sombreamento, se mostrou bastante adequado para bons índices de geração fotovoltaica de energia. Em seguida, o dimensionamento do sistema e a definição das configurações de cada caso consideraram a maior capacidade de geração possível dentro das limitações de projeto, de simulação e dos recursos existentes.

Apesar de apresentarem algumas diferenças quanto ao número de *strings* e às orientações dos painéis em seus arranjos, ambos os casos foram então dimensionados com 24 módulos fotovoltaicos de 55 Wp e 1 inversor de potência igual a 1,5 kW. Foi observado nessa etapa que o inversor escolhido se mostrou um pouco superdimensionado e, apesar de isso não prejudicar necessariamente a operação do sistema, representa um gasto a mais no projeto para a aquisição de um equipamento que não vai operar com a sua capacidade nominal.

O sistema da árvore solar do caso 1, organizado com um arranjo de 2 *strings* com orientação de 23° de inclinação dos painéis e 0° de azimute, tal como apresentam os resultados das simulações realizadas no *software* PVSyst é capaz de gerar 2168 kWh por ano. Já com o arranjo do caso 2, que apresenta 3 *strings* (duas com 15° de inclinação e 45° de azimute e uma com orientação de 45° e -135°), a produção mostrou-se um pouco menor, um total de 1869 kWh por ano.

A partir da avaliação de tais resultados técnicos, é possível identificar que o caso 1 representa um modelo arquitetônico mais eficiente, pois para o mesmo dimensionamento de componentes, mesmas quantidades e especificações técnicas dos equipamentos do sistema, esse modelo apresenta maior geração de energia por ano. Com isso, verifica-se em resultados o que já era esperado pela literatura especializada, a qual recomenda que, em um sistema fotovoltaico, os painéis devem ser instalados orientados para o norte geográfico e com uma inclinação

adequada para incidência perpendicular dos raios solares em suas superfícies.

Como resultados da realização dos estudos presentes nesse trabalho, foi feita a descrição das etapas de construção e implementação do protótipo. A partir delas observou-se que, embora a maior parte das etapas tenha sido concluída, a morosidade burocrática dos processos no setor público, como é o caso da universidade, atrasou a finalização do projeto e a instalação da parte elétrica.

Já quanto aos resultados da análise econômica, determinou-se que o investimento inicial total para o projeto da árvore solar da FT, foi de R\$ 21.154,20 e o preço do kWp, calculado para condições nominais, foi igual a R\$ 16,03.

De fato, uma das principais conclusões foi que o investimento em sistemas de geração conectados à rede elétrica, sendo o caso desse trabalho um SFV, representa uma vantagem em termos de ações para reduzir os gastos energéticos de um prédio público e também do ponto de vista ecológico, ao utilizar energia limpa e renovável de fácil exploração. Quanto ao ponto de vista econômico, entende-se que um projeto, como o realizado nesse estudo, ainda pode ser melhor desenvolvido e alguns gastos podem ser minimizados para que a energia gerada por ele se torne ainda mais competitiva.

Em resumo, tudo o que foi discutido ao longo desse trabalho serviu ao intuito de mostrar que é possível aliar tecnologias de geração de energia a partir fontes renováveis, sistemas conectados à rede em micro ou minigeração distribuída com modelos arquitetônicos diferenciados, mas que não prejudiquem de todo a eficiência do sistema.

Em última análise, avaliou-se que o SFV na forma de árvore solar, para ser conectado à rede, com a capacidade que foi dimensionada para o presente trabalho, se mostrou realizável do ponto de vista técnico. Nesse sentido, muitos dos aspectos de uma instalação tradicional de SFV foram avaliados (como a escolha do melhor local, o estudo de sombreamento e dimensionamento do sistema), mas algumas das muitas particularidades do projeto precisaram ser melhor consideradas e metodologias precisaram ser propostas (como a orientação dos módulos e a definição do arranjo no caso real).

Economicamente, no entanto, a árvore mostrou-se pouco viável. Considerou-se que o protótipo de árvore solar, tal como foi projetado e instalado na Faculdade de Tecnologia, ainda não é um produto finalizado e com os melhores índices de geração energética ao preço mais competitivo possível. Entende-se que o projeto poderia ser ainda mais econômico com algumas pequenas alterações de projeto que permitissem menos gastos com material e mão de obra.

É importante mencionar, contudo, que o projeto encontra fundamento principalmente do ponto de vista de divulgação da tecnologia solar fotovoltaica, de conscientização da

sociedade e ainda, por estar dentro da universidade, próximo da comunidade acadêmica, de poder incentivar os estudos necessários para desenvolver cada vez mais o protótipo e as tecnologias nele envolvidas, tornando-o mais eficiente e econômico.

Por fim, é esperado que os resultados obtidos nesse trabalho, bem como as análises feitas para os aspectos técnicos e econômicos, sejam levados adiante para que haja um acompanhamento constante da operação da árvore solar instalada na FT e para que, possivelmente em um futuro próximo, sejam ainda mais viáveis o planejamento e a implementação de sistemas similares na UnB e em quaisquer outros locais de Brasília, difundindo cada vez mais o uso da energia solar. Nesse sentido, são sugeridas a seguir algumas propostas para motivar trabalhos futuros:

- Estudo de replicação em escala do projeto de árvores solares para áreas urbanas;
- Estudo sobre materiais para confecção de novos protótipos de árvores solares;
- Estudos para elaboração de outros modelos arquitetônicos diferenciados e mais eficientes em projetos de sistemas fotovoltaicos;
- Realização de projeto para incluir baterias no sistema da Árvore solar da FT;
- Realização de projeto para incluir rastreamento de sol no sistema da Árvore solar da FT;
- Estudo de aproveitamento de outras formas de energia ou de sistemas de geração híbridos;
- Realização de projeto para melhorar a integração do sistema ao ambiente da FT e para o aproveitamento *in loco* da energia gerada pela árvore, como a instalação de pontos de tomada e saídas USB para carregar aparelhos eletrônicos;
- Estudo mais aprofundado sobre a análise econômica do projeto e sobre a viabilidade de investimentos em aproveitamento de fontes renováveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro, 2004. 209p.

Aneel – Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 12 de outubro de 2017.

Aneel – Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Cadernos Temáticos da Aneel: Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília, 2016. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). 31p. Acesso em 11 de outubro de 2017.

BARBOSA, L. **Especificação Técnica para implementação de Árvore Solar na Faculdade de Tecnologia**. 2014. Trabalho de Iniciação Científica, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, UnB, Brasília.

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento. **Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP)**. Disponível em: [www.bndes.gov.br](http://www.bndes.gov.br). Acesso em: 21 de novembro de 2017.

CEB – Companhia Energética Brasileira. **Estrutura Tarifária**. Brasília. Disponível em: [www.ceb.com.br](http://www.ceb.com.br). Acesso em: 20 de novembro de 2017.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br).

DUARTE, M. M. (2016). **Análise técnico-econômica acerca da implementação de geração solar fotovoltaica no Centro de Ensino Médio Taguatinga Norte**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

FRAUNHOFER ISE – Instituto Fraunhofer. **Photovoltaics Report**. 2016 Disponível em: [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de). 43p.

IEA – International Energy Agency. *Energy, Climate Change and Environment 2016 Insights*. Paris, 2016. Disponível em: [www.iea.org](http://www.iea.org). 129p.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos, 2006. 60p.

INSTITUTO IDEAL. *O mercado brasileiro da geração distribuída - Edição 2017*. Florianópolis, 2017. Disponível em: [www.issuu.com](http://www.issuu.com). Acesso em: 20 de outubro de 2017. 68p.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. *Acordo de Paris*. Disponível em: [www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br). Acesso em: 2 de outubro de 2017.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima - Sumário Executivo*. Brasília, 2016. Disponível em [www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br). Acesso em 6 de outubro de 2017. 12p.

MME – Ministério de Minas e Energia. *Apresentação ProGD: Ações de Estímulo à geração distribuída com base em fontes renováveis*. Brasília, 2015. Disponível em: [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br).

MME – Ministério de Minas e Energia. *Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2016*. 2017. Disponível em: [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br). Acesso em 11 de outubro de 2017.

MOOMAW, W., F. YAMBA, M. KAMIMOTO, L. MAURICE, J. NYBOER, K. URAMA, T. WEIR. *Introduction. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. 2011. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Acesso em 2 de outubro de 2017.

ONU – Organização das Nações Unidas. *Objetivos de Desenvolvimento sustentável - Agenda 2030*. 2015. Disponível em: [www.nacoesunidas.org](http://www.nacoesunidas.org). Acesso em 4 de outubro de 2017.

PARIS AGREEMENT. *PARIS AGREEMENT SHORT GLOSSARY*. 2015. Disponível em: [www.cop21.gouv.fr](http://www.cop21.gouv.fr). Acesso em: 4 de outubro de 2017.

PV Upscale – Urban Scale Photovoltaic Systems. *Solar City Gleisdorf*. 2007. Disponível em: [www.pvupscale.org](http://www.pvupscale.org). Acesso em: 6 de novembro de 2017.

SUNEW – Catálogo de Produtos, OPTree, Fornecimento Metalco. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: [sunew.com.br](http://sunew.com.br). Acesso em: 6 de novembro de 2017.

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco. *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos*. 2000. Disponível em: [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br) Acesso em: 19 de outubro de 2017. 111p.

VILLALVA, M. G. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. Sistemas isolados e conectados à rede*. 2a edição. São Paulo, ÉRICA, 2015. 220p.

WWF-Brasil, UnB – World Wildlife Fund Brasil, Universidade de Brasília. *Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília*. Brasília, 2016. 32p.

**APÊNDICE**

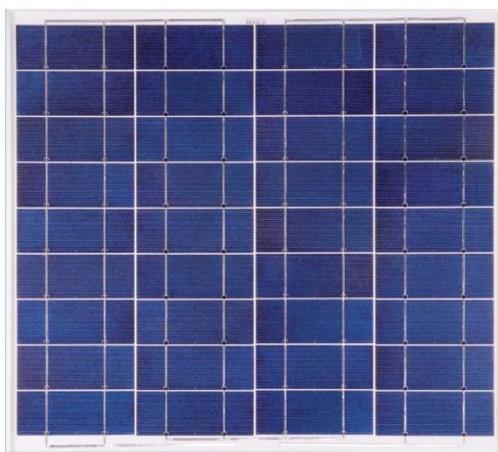
## I. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS MODELOS DE PAINÉIS E INVERSOR (INFORMAÇÕES DOS FABRICANTES)

### ESPECIFICAÇÕES DO PAINEL

**YGE 55  
SERIES**  
Powered by **YINGLI**

YL055P-17b 2/5

YL050P-17b 2/5



#### ABOUT YINGLI GREEN ENERGY

Yingli Green Energy Holding Company Limited (NYSE: YGE) is one of the world's largest fully vertically integrated PV manufacturers. With over 4.5 GW of modules installed globally, we are a leading solar energy company built upon proven product reliability and sustainable performance. We are the first renewable energy company and the first Chinese company to sponsor the FIFA World Cup™.

#### PERFORMANCE

High efficiency, polycrystalline solar cells with high transmission and textured glass delivering a module efficiency of up to 13.2%, minimizing installation costs and maximizing the kWh output of your system per unit area.

#### QUALITY AND RELIABILITY

- Industry leading in-house manufacturing of polysilicon, ingots, wafers, cells and modules ensures tight control of our material and production quality.
- Robust, corrosion resistant aluminum frame independently tested to withstand wind loads of 2.4 kPa and snow loads of 2.4 kPa ensuring a stable mechanical life for your modules.
- Module packaging optimized to protect product during transportation and minimize on-site waste.
- This type of module is commonly use for the small off-grid system.

#### QUALIFICATIONS AND CERTIFICATES

IEC 61215, IEC 61730, CGC, ISO 9001:2008



# YGE 55 SERIES

## ELECTRICAL PERFORMANCE

### Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

			YGE 55	YGE 50
Module name			YL55P-17b 2/5	YL50P-17b 2/5
Module type				
Power output	$P_{max}$	W	55	50
Power output tolerances	$\Delta P_{max}$	%	+/- 5	
Module efficiency	$\eta_m$	%	13.2	12.0
Voltage at $P_{max}$	$V_{mpp}$	V	17.83	17.34
Current at $P_{max}$	$I_{mpp}$	A	3.08	2.88
Open-circuit voltage	$V_{oc}$	V	22.07	21.46
Short-circuit current	$I_{sc}$	A	3.28	3.10

STC: 1000W/m<sup>2</sup> irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.  
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m<sup>2</sup> according to EN 60904-1.

### Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Power output	$P_{max}$	W	44.55	40.50
Voltage at $P_{max}$	$V_{mpp}$	V	16.43	15.98
Current at $P_{max}$	$I_{mpp}$	A	2.47	2.31
Open-circuit voltage	$V_{oc}$	V	20.08	19.53
Short-circuit current	$I_{sc}$	A	2.62	2.48

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m<sup>2</sup> irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

## THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of $P_{max}$	$\gamma$	%/°C	-0.45
Temperature coefficient of $V_{oc}$	$\beta_{voc}$	%/°C	-0.33
Temperature coefficient of $I_{sc}$	$\alpha_{isc}$	%/°C	0.06

## OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	50V <sub>DC</sub>
Max. series fuse rating	5A
Limiting reverse current	Do not apply external voltages larger than Voc of the module
Operating temperature range	-40 to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	2400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

## CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions)	36 / multicrystalline silicon / 156mm x 62.4mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color)	anodized aluminum alloy / silver / clear

- Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
- The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.  
service@yinglisolar.com  
Tel: 0086-312-8929802

YINGLISOLAR.COM

© Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. | DS\_YL055P-17b\_25\_EU\_EN\_201302\_v02.3

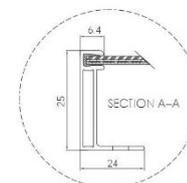
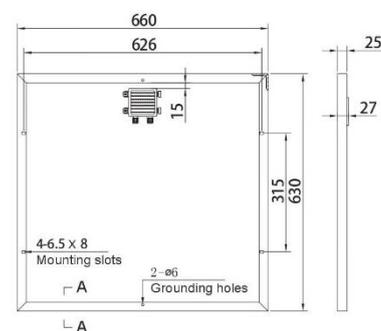
## GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	660mm / 630mm / 25mm
Weight	4.79kg

## PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per box	6
Packaging box dimensions (L / W / H)	690mm / 660mm / 210mm

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Our Partners:



## ESPECIFICAÇÕES DO INVERSOR

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging



SHIFTING THE LIMITS

### FRONIUS GALVO

/ The future-proof inverter for small self-consumption systems.



/ SnapInverter  
Technology



/ HF transformer  
switchover



/ Integrated data  
communication



/ Smart Grid  
Ready



/ With power categories ranging from 1.5 to 3.1 kW, the Fronius Galvo is perfect for households – and is especially suitable for self-consumption systems. The integrated energy management relay allows the self-consumption component to be maximised. A host of other smart features make the Fronius Galvo one of the most future-proof inverters in its class: for example, the integrated datalogging, the simple connection to the internet by WLAN, or the plug-in card technology for retrofitting additional functions.

#### TECHNICAL DATA FRONIUS GALVO

INPUT DATA	GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.0-1 <sup>1)</sup>	GALVO 3.1-1
Max. input current ( $I_{dc\ max}$ )	13.3 A	17.8 A	16.6 A	19.8 A	20.7 A
Max. array short circuit current	20.0 A	26.8 A	24.8 A	29.6 A	31.0 A
Min. input voltage ( $U_{dc\ min}$ )		120 V		165 V	
Feed-in start voltage ( $U_{dc\ start}$ )		140 V		185 V	
Nominal input voltage ( $U_{dc\ n}$ )		260 V		330 V	
Max. input voltage ( $U_{dc\ max}$ )		420 V		550 V	
MPP voltage range ( $U_{mpp\ min} - U_{mpp\ max}$ )		120 - 335 V		165 - 440 V	
Number of MPP trackers			1		
Number of DC connections			3		
OUTPUT DATA	GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.0-1 <sup>1)</sup>	GALVO 3.1-1
AC nominal output ( $P_{ac\ n}$ )	1,500 W	2,000 W	2,500 W	3,000 W	3,100 W
Max. output power	1,500 VA	2,000 VA	2,500 VA	3,000 VA	3,100 VA
AC output current ( $I_{ac\ nom}$ )	6.5 A	8.7 A	10.9 A	13.0 A	13.5 A
Grid connection (voltage range)			1-NPE 230 V (+17% / -20%)		
Frequency (frequency range)			50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)		
Total harmonic distortion			< 4 %		
Power factor ( $\cos\ \varphi_{ac\ r}$ )			0.85 - 1 ind. / cap.		
GENERAL DATA	GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.0-1 <sup>1)</sup>	GALVO 3.1-1
Dimensions (height x width x depth)			645 x 431 x 204 mm		
Weight		16.4 kg		16.8 kg	
Degree of protection			IP 65		
Protection class			1		
Overvoltage category (DC / AC) <sup>2)</sup>			2 / 3		
Night-time consumption			< 1 W		
Inverter concept			HF transformer		
Cooling			Regulated air cooling		
Installation			Indoor and outdoor installation		
Ambient temperature range			-25 - +50 °C		
Permitted humidity			0 to 100 %		
Max. altitude			2,000 m / 3,500 m (unrestricted / restricted voltage range)		
DC connection technology			Screw terminal connection 2.5 mm <sup>2</sup> - 16 mm <sup>2</sup>		
AC connection technology			Screw terminal connection 2.5 mm <sup>2</sup> - 16 mm <sup>2</sup>		
Certificates and compliance with standards			ÖVE / ÖNORM E 8001-4-712, AS 4777-2, AS 4777-3, AS3100, DIN V VDE 0126-1-1/A1, VDE AR N 4105, IEC 62109-1-2, IEC 62116, IEC 61727, CER 06-190, CEI 0-21, EN 50438, G83, G59, NRS 097		

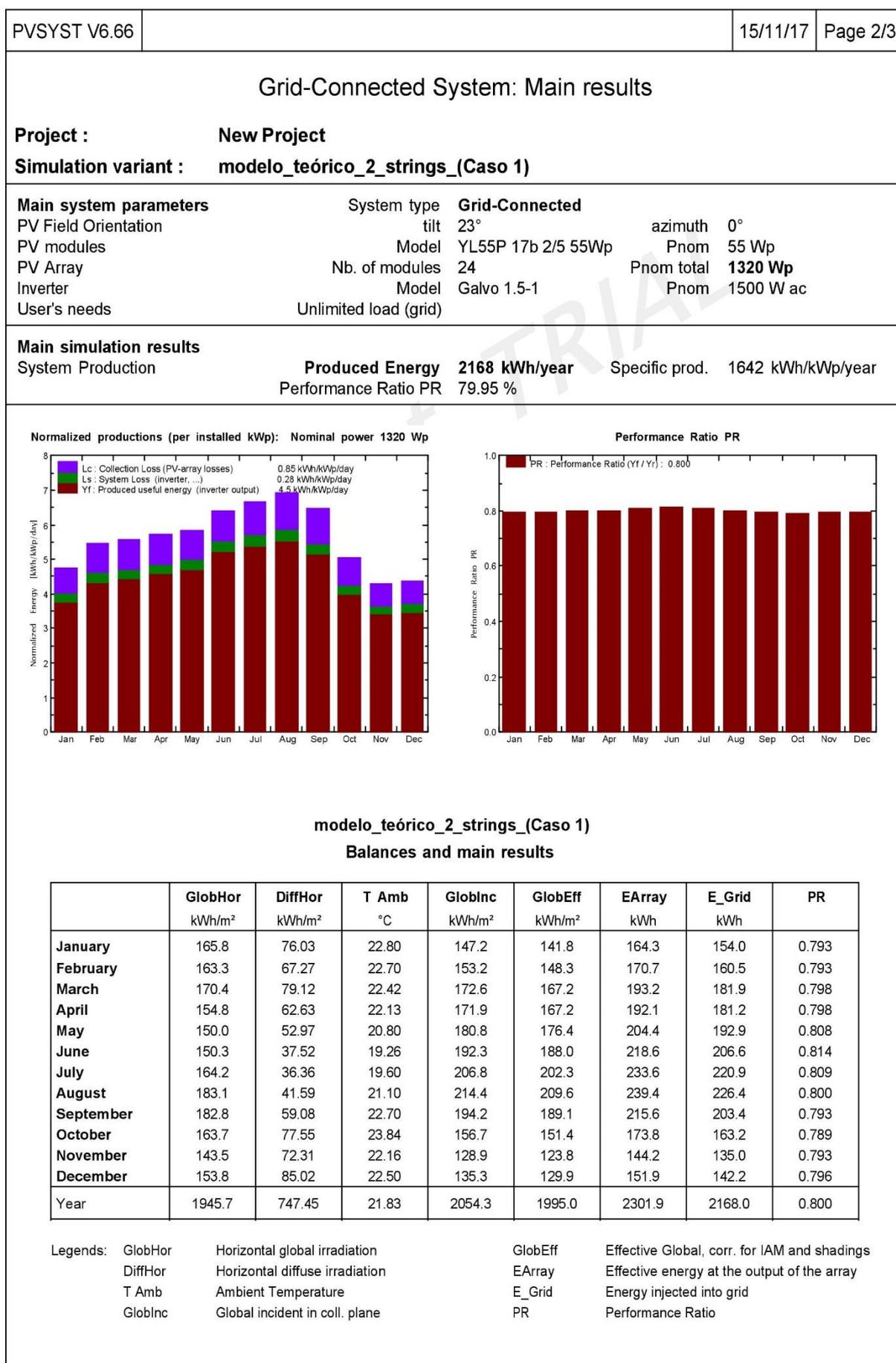
<sup>1)</sup> Available for countries where 3 kW restrictions apply. <sup>2)</sup> Testing to IEC 62109-1.

Further information regarding the availability of the inverters in your country can be found at [www.fronius.com](http://www.fronius.com).

## II. RELATÓRIOS DAS SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO DA ÁRVORE SOLAR (CASOS 1 E 2)

### MODELO TEÓRICO – CASO 1

PVSYST V6.66		15/11/17	Page 1/3
<b>Grid-Connected System: Simulation parameters</b>			
<b>Project :</b>	<b>New Project</b>		
<b>Geographical Site</b>	<b>Brasilia</b>	<b>Country</b>	<b>Brazil</b>
<b>Situation</b>	Latitude -15.55° S	Longitude	-47.96° W
Time defined as	Legal Time	Time zone	UT-3
	Albedo	Altitude	895 m
<b>Meteo data:</b>	<b>Brasilia</b>	Meteonorm 7.1 (1900-1900), Sat=37% - Synthetic	
<b>Simulation variant :</b>	<b>modelo_teorico_2_strings_(Caso 1)</b>		
	Simulation date	15/11/17 20h26	
<b>Simulation parameters</b>			
<b>Collector Plane Orientation</b>	Tilt	23°	Azimuth 0°
<b>Models used</b>	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteonorm
<b>Horizon</b>	Free Horizon		
<b>Near Shadings</b>	No Shadings		
<b>PV Array Characteristics</b>			
<b>PV module</b>	Si-poly	Model	<b>YL55P 17b 2/5 55Wp</b>
Custom parameters definition	Manufacturer	Yingli	
Number of PV modules	In series	12 modules	In parallel 2 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	24	Unit Nom. Power 55 Wp
Array global power	Nominal (STC)	<b>1320 Wp</b>	At operating cond. 1188 Wp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	193 V	I mpp 6.2 A
Total area	Module area	<b>10.0 m<sup>2</sup></b>	Cell area 8.4 m <sup>2</sup>
<b>Inverter</b>			
Original PVSyst database	Model	<b>Galvo 1.5-1</b>	
Characteristics	Manufacturer	Fronius International	
Inverter pack	Operating Voltage	120-335 V	Unit Nom. Power 1.50 kWac
	Nb. of inverters	1 units	Total Power 1.5 kWac
<b>PV Array loss factors</b>			
Thermal Loss factor	Uc (const)	29.0 W/m <sup>2</sup> K	Uv (wind) 0.0 W/m <sup>2</sup> K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	522 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
Serie Diode Loss	Voltage Drop	0.7 V	Loss Fraction 0.3 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction 2.5 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 1.0 % at MPP
Strings Mismatch loss			Loss Fraction 0.10 %
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param. 0.05
<b>User's needs :</b>	Unlimited load (grid)		

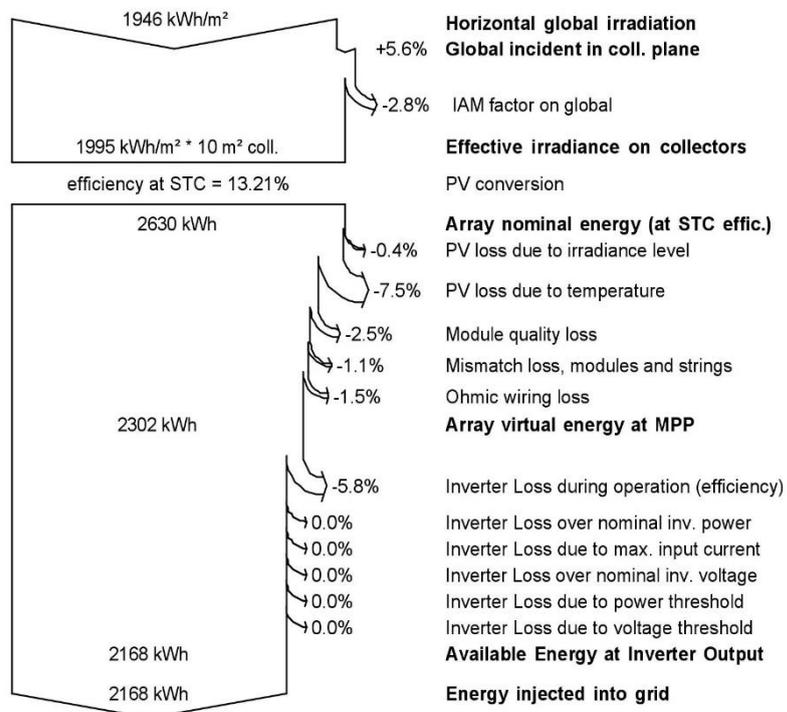


### Grid-Connected System: Loss diagram

**Project :** New Project  
**Simulation variant :** modelo\_teorico\_2\_strings\_(Caso 1)

<b>Main system parameters</b>	System type	<b>Grid-Connected</b>	
PV Field Orientation	tilt	23°	azimuth 0°
PV modules	Model	YL55P 17b 2/5 55Wp	Pnom 55 Wp
PV Array	Nb. of modules	24	Pnom total <b>1320 Wp</b>
Inverter	Model	Galvo 1.5-1	Pnom 1500 W ac
User's needs	Unlimited load (grid)		

#### Loss diagram over the whole year



## MODELO REAL – CASO 2

PVSYST V6.66		15/11/17	Page 1/3
<b>Grid-Connected System: Simulation parameters</b>			
<b>Project : New Project</b>			
<b>Geographical Site</b>	<b>Brasilia</b>	<b>Country</b>	<b>Brazil</b>
<b>Situation</b>	Latitude -15.55° S	Longitude	-47.96° W
Time defined as	Legal Time Time zone UT-3	Altitude	895 m
	Albedo 0.20		
<b>Meteo data:</b>	<b>Brasilia</b>	Meteonorm 7.1 (1900-1900), Sat=37% - Synthetic	
<b>Simulation variant : modelo_real_3_Strings_(Caso 2)</b>			
	Simulation date	15/11/17 20h15	
<b>Simulation parameters</b>			
<b>2 orientations</b>	Tilts/Azimuths	15°/45° and 45°/-135°	
<b>Models used</b>	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteonorm
<b>Horizon</b>	Free Horizon		
<b>Near Shadings</b>	No Shadings		
<b>PV Array Characteristics</b>			
<b>PV module</b>	Si-poly	Model	<b>YL55P 17b 2/5 55Wp</b>
Custom parameters definition	Manufacturer	Yingli	
Number of PV modules	In series	8 modules	In parallel 3 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	24	Unit Nom. Power 55 Wp
Array global power	Nominal (STC)	<b>1320 Wp</b>	At operating cond. 1188 Wp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	128 V	I mpp 9.3 A
Total area	Module area	<b>10.0 m²</b>	Cell area 8.4 m²
<b>Inverter</b>			
Original PVSyst database	Model	<b>Galvo 1.5-1</b>	
Characteristics	Manufacturer	Fronius International	
	Operating Voltage	120-335 V	Unit Nom. Power 1.50 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	1 units	Total Power 1.5 kWac
<b>PV Array loss factors</b>			
Thermal Loss factor	Uc (const)	29.0 W/m²K	Uv (wind) 0.0 W/m²K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	232 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
Serie Diode Loss	Voltage Drop	0.7 V	Loss Fraction 0.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction 2.5 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 1.0 % at MPP
Strings Mismatch loss			Loss Fraction 0.10 %
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM = 1 - bo (1/cos i - 1)		bo Param. 0.05
<b>User's needs :</b>	Unlimited load (grid)		

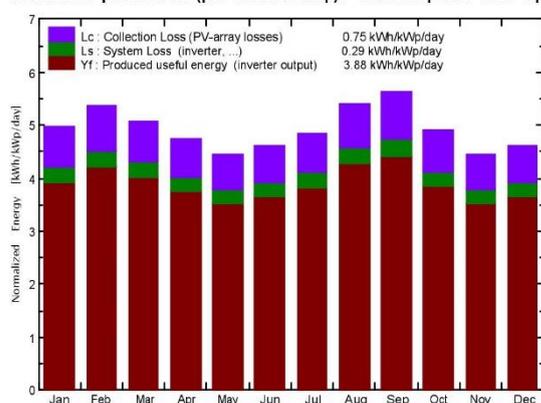
## Grid-Connected System: Main results

**Project :** New Project  
**Simulation variant :** modelo\_real\_3\_Strings\_(Caso 2)

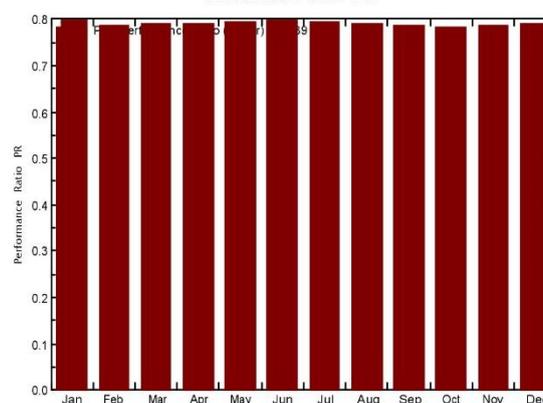
<b>Main system parameters</b>	System type	<b>Grid-Connected</b>
PV Field Orientation	2 orientations	Tilt/Azimuth = 15°/45° and 45°/-135°
PV modules	Model	YL55P 17b 2/5 55Wp Pnom 55 Wp
PV Array	Nb. of modules	24 Pnom total <b>1320 Wp</b>
Inverter	Model	Galvo 1.5-1 Pnom 1500 W ac
User's needs	Unlimited load (grid)	

<b>Main simulation results</b>	<b>Produced Energy</b>	<b>1869 kWh/year</b>	Specific prod. 1416 kWh/kWp/year
System Production	Performance Ratio PR	78.86 %	

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 1320 Wp



Performance Ratio PR



### modelo\_real\_3\_Strings\_(Caso 2) Balances and main results

	GlobHor	DiffHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh	
<b>January</b>	165.8	76.03	22.80	154.5	149.4	171.9	159.9	0.784
<b>February</b>	163.3	67.27	22.70	150.5	145.7	167.3	155.9	0.785
<b>March</b>	170.4	79.12	22.42	157.3	151.9	176.0	164.0	0.790
<b>April</b>	154.8	62.63	22.13	142.6	137.5	159.3	148.5	0.789
<b>May</b>	150.0	52.97	20.80	137.9	132.8	155.2	144.5	0.794
<b>June</b>	150.3	37.52	19.26	137.9	132.4	155.4	144.8	0.796
<b>July</b>	164.2	36.36	19.60	149.9	144.2	168.2	156.9	0.793
<b>August</b>	183.1	41.59	21.10	167.7	162.0	186.9	174.6	0.789
<b>September</b>	182.8	59.08	22.70	168.6	163.3	187.3	174.9	0.786
<b>October</b>	163.7	77.55	23.84	151.9	147.0	168.7	157.0	0.783
<b>November</b>	143.5	72.31	22.16	133.8	129.3	149.8	139.1	0.787
<b>December</b>	153.8	85.02	22.50	143.1	138.2	160.5	149.1	0.789
<b>Year</b>	1945.7	747.45	21.83	1795.6	1733.6	2006.6	1869.2	0.789

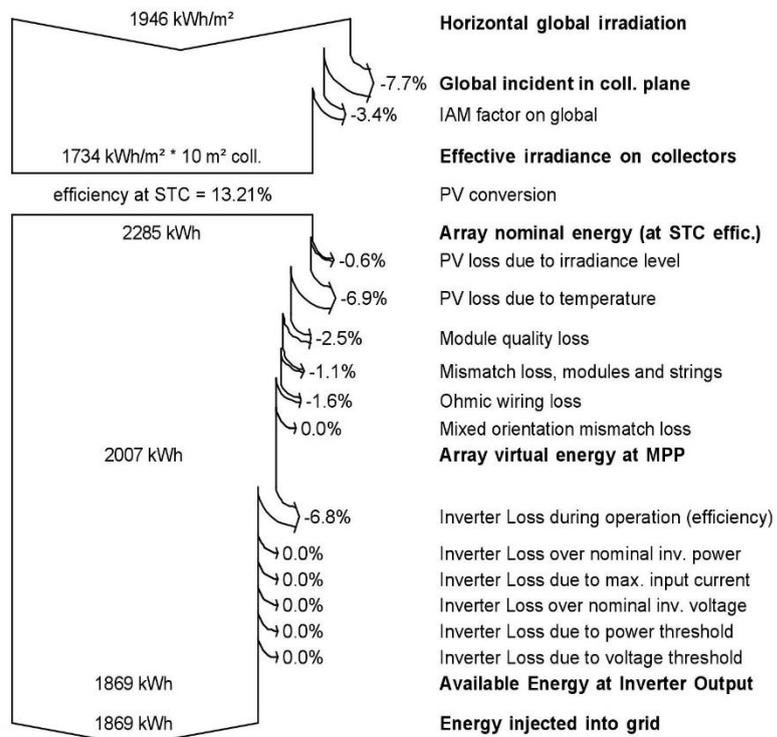
Legends:	GlobHor	Horizontal global irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
	DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
	T Amb	Ambient Temperature	E_Grid	Energy injected into grid
	GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

### Grid-Connected System: Loss diagram

**Project :** New Project  
**Simulation variant :** modelo\_real\_3\_Strings\_(Caso 2)

<b>Main system parameters</b>	System type	<b>Grid-Connected</b>	
PV Field Orientation	2 orientations	Tilt/Azimuth = 15°/45° and 45°/-135°	
PV modules	Model	YL55P 17b 2/5 55Wp	Pnom 55 Wp
PV Array	Nb. of modules	24	Pnom total <b>1320 Wp</b>
Inverter	Model	Galvo 1.5-1	Pnom 1500 W ac
User's needs	Unlimited load (grid)		

#### Loss diagram over the whole year



### III. TABELAS DE ALOCAÇÃO DE CARGAS

Tabela III.1 – Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de Agosto (melhor mês) – caso 1.

Aparelhos	Potência (kW)	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Energia Injetada na rede	-	0	0,24	0,55	0,78	0,94	0,99	1,01	0,94	0,81	0,61	0,36	0,08
celular	0,0015	0,00	160	366	520	626	660	673	626	540	406	240	53,3
notebook	0,02	0,00	12,0	27,5	39,0	47,0	49,5	50,5	47,0	40,5	30,5	18,0	4,00
computador	0,063	0,00	3,81	8,73	12,4	14,9	15,7	16,0	14,9	12,9	9,68	5,71	1,27
modem	0,008	0,00	30,0	68,8	97,5	117	124	126	117	101	76,2	45,0	10,0
lâmpadas 14W	0,014	0,00	17,1	39,3	55,7	67,1	70,7	72,1	67,1	57,9	43,6	25,7	5,71
lâmpadas 20W	0,02	0,00	12,0	27,5	39,0	47,0	49,5	50,5	47,0	40,5	30,5	18,0	4,00
lâmpadas 28W	0,028	0,00	8,57	19,6	27,9	33,6	35,4	36,1	33,6	28,9	21,8	12,9	2,86
lâmpadas 32W	0,032	0,00	7,50	17,2	24,4	29,4	30,9	31,6	29,4	25,3	19,1	11,2	2,50
lâmpadas 40W	0,04	0,00	6,00	13,8	19,5	23,5	24,8	25,3	23,5	20,3	15,3	9,00	2,00

Tabela III.2 – Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de Novembro (mês crítico) – caso 1.

Aparelhos	Potência (kW)	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Energia Injetada na rede	-	0,07	0,24	0,39	0,52	0,6	0,55	0,56	0,52	0,45	0,36	0,2	0,05
celular	0,0015	46,7	160	260	346	400	366	373	346	300	240	133	33,3
notebook	0,02	3,50	12,0	19,5	26,0	30,0	27,5	28,0	26,0	22,5	18,0	10,0	2,50
computador	0,063	1,11	3,81	6,19	8,25	9,52	8,73	8,89	8,25	7,14	5,71	3,17	0,79
modem	0,008	8,75	30,0	48,8	65,0	75,0	68,8	70,0	65,0	56,3	45,0	25,0	6,25
lâmpadas 14W	0,014	5,00	17,1	27,9	37,1	42,9	39,3	40,0	37,1	32,1	25,7	14,3	3,57
lâmpadas 20W	0,02	3,50	12,0	19,5	26,0	30,0	27,5	28,0	26,0	22,5	18,0	10,0	2,50
lâmpadas 28W	0,028	2,50	8,57	13,9	18,6	21,4	19,6	20,0	18,6	16,1	12,9	7,14	1,79
lâmpadas 32W	0,032	2,19	7,50	12,2	16,3	18,8	17,2	17,5	16,3	14,1	11,3	6,25	1,56
lâmpadas 40W	0,04	1,75	6,00	9,75	13,0	15,0	13,8	14,0	13,0	11,3	9,00	5,00	1,25

Tabela III.3 – Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de um mês médio – caso 1.

Aparelhos	Potência (kW)	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Energia Injetada na rede	-	0,02	0,22	0,45	0,63	0,75	0,79	0,8	0,75	0,65	0,5	0,3	0,07
celular	0,0015	13,3	146	300	420	500	526	533	500	433	333	200	46,6
notebook	0,02	1,00	11,0	22,5	31,5	37,5	39,5	40,0	37,5	32,5	25,0	15,0	3,50
computador	0,063	0,32	3,49	7,14	10,0	11,9	12,5	12,7	11,9	10,3	7,94	4,76	1,11
modem	0,008	2,50	27,5	56,3	78,8	93,8	98,8	100	93,8	81,3	62,5	37,5	8,75
lâmpadas 14W	0,014	1,43	15,7	32,1	45,0	53,6	56,4	57,1	53,6	46,4	35,7	21,4	5,00
lâmpadas 20W	0,02	1,00	11,0	22,5	31,5	37,5	39,5	40,0	37,5	32,5	25,0	15,0	3,50
lâmpadas 28W	0,028	0,71	7,86	16,1	22,5	26,8	28,2	28,6	26,8	23,2	17,9	10,7	2,50
lâmpadas 32W	0,032	0,63	6,88	14,1	19,7	23,4	24,7	25,0	23,4	20,3	15,6	9,38	2,19
lâmpadas 40W	0,04	0,50	5,50	11,3	15,8	18,3	19,7	20,0	18,8	16,3	12,5	7,50	1,75

Tabela III.4 – Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de Setembro (melhor mês) – caso 2.

Aparelhos	Potência (kW)	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Energia Injetada na rede	-	0,02	0,23	0,44	0,63	0,75	0,76	0,77	0,71	0,6	0,48	0,32	0,12
celular	0,0015	13,3	153	293	420	500	506	513	473	400	320	213	80,0
notebook	0,02	1,00	11,5	22,0	31,5	37,5	38,0	38,5	35,5	30,0	24,0	16,0	6,00
computador	0,063	0,32	3,65	6,98	10,0	11,9	12,1	12,2	11,3	9,52	7,62	5,08	1,90
modem	0,008	2,50	28,8	55,0	78,8	93,8	95,0	96,3	88,8	75,0	60,0	40,0	15,0
lâmpadas 14W	0,014	1,43	16,4	31,4	45,0	53,6	54,3	55,0	50,7	42,9	34,3	22,9	8,57
lâmpadas 20W	0,02	1,00	11,5	22,0	31,5	37,5	38,0	38,5	35,5	30,0	24,0	16,0	6,00
lâmpadas 28W	0,028	0,71	8,21	15,7	22,5	26,8	27,1	27,5	25,4	21,4	17,1	11,4	4,29
lâmpadas 32W	0,032	0,63	7,19	13,8	19,7	23,4	23,8	24,1	22,2	18,8	15,0	10,0	3,75
lâmpadas 40W	0,04	0,50	5,75	11,0	15,8	18,8	19,0	19,3	17,8	15,0	12,0	8,00	3,00

*Tabela III.5 – Quantidades de cargas por hora com geração solar em um dia de Novembro  
(mês crítico) – caso 2.*

<b>Aparelhos</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>6h</b>	<b>7h</b>	<b>8h</b>	<b>9h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>
<b>Energia Injetada na rede</b>	-	<b>0,12</b>	<b>0,28</b>	<b>0,41</b>	<b>0,53</b>	<b>0,6</b>	<b>0,54</b>	<b>0,55</b>	<b>0,5</b>	<b>0,44</b>	<b>0,35</b>	<b>0,22</b>	<b>0,09</b>
<b>celular</b>	0,0015	80,0	186	273	353	400	360	366	333	293	233	146	60,0
<b>notebook</b>	0,02	6,00	14,0	20,5	26,5	30,0	27,0	27,5	25,0	22,0	17,5	11,0	4,50
<b>computador</b>	0,063	1,90	4,44	6,51	8,41	9,52	8,57	8,73	7,94	6,98	5,56	3,49	1,43
<b>modem</b>	0,008	15,0	35,0	51,3	66,3	75,0	67,5	68,8	62,5	55,0	43,8	27,5	11,3
<b>lâmpadas 14W</b>	0,014	8,57	20,0	29,3	37,9	42,9	38,6	39,3	35,7	31,4	25,0	15,7	6,43
<b>lâmpadas 20W</b>	0,02	6,00	14,0	20,5	26,5	30,0	27,0	27,5	25,0	22,0	17,5	11,0	4,50
<b>lâmpadas 28W</b>	0,028	4,29	10,0	14,6	18,9	21,4	19,3	19,6	17,9	15,7	12,5	7,86	3,21
<b>lâmpadas 32W</b>	0,032	3,75	8,75	12,8	16,6	18,8	16,9	17,2	15,6	13,8	10,9	6,88	2,81
<b>lâmpadas 40W</b>	0,04	3,00	7,00	10,3	13,3	15,0	13,5	13,8	12,5	11,0	8,75	5,50	2,25

#### IV. TABELAS DE ECONOMIA DO SFV CONSIDERANDO AS BANDEIRAS TARIFÁRIAS VIGENTES

Tabela IV.1 – Economia do SFV do caso 1 considerando as bandeiras tarifárias dos últimos meses.

Mês/ano	Bandeira tarifária vigente	Acréscimo por kWh	Geração do arranjo no mês [kWh]	Economia [R\$]
Mar/17	Amarela	R\$ 0,010	178,6	94,66
Abr/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	183,1	100,71
Mai/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	189,4	104,17
Jun/17	Verde	0	209,2	108,78
Jul/17	Amarela	R\$ 0,010	215,8	114,37
Ago/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	221,8	121,99
Set/17	Amarela	R\$ 0,010	206,2	109,29
Out/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	160,6	88,33
Nov/17	Vermelha (P2**)	R\$ 0,050	137,8	78,55
Dez/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	140,5	77,28

Tabela IV.2 – Economia do SFV do caso 2 considerando as bandeiras tarifárias dos últimos meses.

Mês/ano	Bandeira tarifária vigente	Acréscimo por kWh	Geração do arranjo no mês	Economia [R\$]
Mar/17	Amarela	R\$ 0,010	160,5	85,07
Abr/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	150	82,50
Mai/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	141,9	78,05
Jun/17	Verde	0	147	76,44
Jul/17	Amarela	R\$ 0,010	153,6	81,41
Ago/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	171,6	94,38
Set/17	Amarela	R\$ 0,010	177	93,81
Out/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	153,9	84,65
Nov/17	Vermelha (P2**)	R\$ 0,050	141	80,37
Dez/17	Vermelha (P1*)	R\$ 0,030	146,7	80,69