

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESEMPENHO OPERACIONAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS
EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO *MULTICAMPI*

TERESINA-PI

2018

FABRICIO HIGO MONTURIL DE MORAIS

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS
EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO *MULTICAMPI***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Piauí, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Rocha Barbosa
Co-orientador: Prof. Dr. Albemerc Moura de Moraes

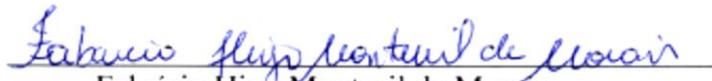
TERESINA-PI

2018

FABRICIO HIGO MONTURIL DE MORAIS

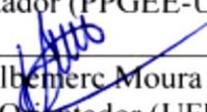
**DESEMPENHO OPERACIONAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS
EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO *MULTICAMPI***

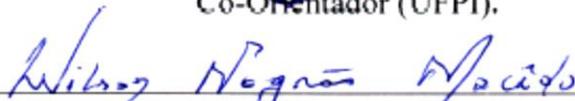
Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Piauí.

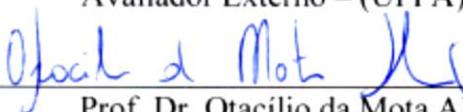

Fabricio Higo Monturil de Moraes
Pós-Graduando (PPGEE-UFPI)

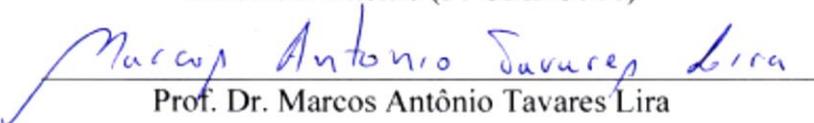
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Fábio Rocha Barbosa
Orientador (PPGEE-UFPI).


Prof. Dr. Albenere Moura de Moraes
Co-Orientador (UFPI).


Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo - UFPA
Avaliador Externo – (UFPA)


Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida
Avaliador Interno (PPGEE-UFPI)


Prof. Dr. Marcos Antônio Tavares Lira
Avaliador Interno (PPGEE-UFPI)

Teresina, 19 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido mais esta graça e por todas as oportunidades que tem me dado, me conduzindo e iluminando nos caminhos difíceis e estando sempre à frente dos meus projetos de vida, a Ele toda honra, glória e louvor.

Aos meus pais, Osvaldino Cardoso e Digenane Iêly, por terem me propiciado uma criação maravilhosa, pelos ensinamentos, conselhos e broncas, me ensinando os verdadeiros valores que todos devem ter não só para ser um cidadão de bem, mas para ser um bom pai, um bom marido e um exemplo para outras pessoas, e, principalmente por terem me colocado no caminho dos estudos, pois sem essas mãos para me guiar nesse caminho, eu nunca teria chegado onde cheguei. Também à minha irmã, Andréia Suellen, pela união, companheirismo e respeito, sempre me apoiando em minhas decisões de vida.

Agradeço à minha esposa, Hercylianna Pamplonna, companheira e parceira, por me ajudar de forma amorosa, sensível e carinhosa tanto nos momentos bons, quanto nos momentos difíceis, sempre me mostrando como agir e pensar com atenção e sabedoria. Também por ter me dado uma filha linda, Heloísa Maria, motivo maior para nunca desistir no meio do caminho, e lembrar que sempre existe alguém que nos observa sem se manifestar, buscando exemplos a serem seguidos para toda a vida.

Aos meus amigos de longas datas, Compadre Felipe Melo, Adriano Batista, Hércules Lima, Rodrigo Teixeira, e aos novos amigos que fiz durante o mestrado, os Pinguins Sérgio, Igor e Juan, que muito contribuíram, e ainda contribuem na minha vida pessoal e profissional, sendo exemplos a seguir não só como profissionais, mais como pessoas humanas que são. E em especial, agradeço ao meu amigo Osvaldo Augusto, pois sem sua valiosa ajuda e colaboração, esta etapa de minha vida não teria sido vencida. Principalmente, agradeço por sempre me incentivar ir cada vez mais além. Obrigado!

Agradeço ainda ao meu orientador, Prof. Fábio Rocha e ao meu Co-orientador, Prof. Albemerc, pela contribuição intelectual e pelos ensinamentos dados, pela paciência e apoio no desenvolvimento deste trabalho. Aos professores Marcos Lira, Otacílio Almeida e Wilson Negrão, em participar de minha banca e pela disposição em ajudar sempre que os procurei.

Agradeço também a todos que não foram citados, mas que direta ou indiretamente me ajudaram no desenvolvimento e conclusão desta pesquisa, me transmitindo conhecimento ou ajudando quando foram solicitados.

RESUMO

Em fevereiro de 2015, foi publicada a Portaria nº 23/2015 do Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão. A mesma estabelece boas práticas de gestão e uso de energia elétrica e água nos órgãos e entidades da Administração Pública Federal como a utilização de módulos fotovoltaicos. Em se tratando do universo das instituições de ensino, de acordo com o Ministério da Educação e Cultura, as mesmas devem constituir-se como espaços educadores sustentáveis modernizando as edificações para o uso eficiente dos insumos e redução dos impactos ambientais. Por outro lado, é possível perceber um aumento na quantidade de sistemas fotovoltaicos instalados no estado do Piauí e uma crescente utilização desta fonte de energia no âmbito das instituições de ensino. Assim surgiram os seguintes questionamentos norteadores desta pesquisa: Como se dá o desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos instalados em instituições de ensino *multicampi* no estado do Piauí? A análise de desempenho operacional pode ser feita se forem utilizados dados de irradiação solar provenientes de outras fontes que não as sugeridas pelas normas? É possível analisar possibilidades de replicação de sistemas fotovoltaicos nas instituições de ensino *multicampi*, estimando a energia a ser produzida utilizando tais dados de irradiação? Quais benefícios a replicação de sistemas fotovoltaicos trará para as instituições de ensino? Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivo Geral fornecer subsídios para os gestores de instituições de ensino de caráter *multicampi* analisarem a viabilidade técnico-econômica da replicação de sistemas fotovoltaicos, de modo a evitar grandes margens de erros nas estimativas de geração de energia elétrica. Através da análise do Sistema IFPI-FLORIANO, objeto de estudo desta pesquisa, foi verificado que os sistemas fotovoltaicos instalados em instituições de ensino podem apresentar excelentes desempenhos devido ao grande potencial para a utilização desta fonte no estado. O sistema teve uma produtividade de 1.493,12 kWh/kWp, um Fator de Capacidade de 17,04% e um Desempenho Global de 73,54 %. Verificou-se também que não é possível analisar o desempenho operacional dados de radiação solar global coletados através das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia, porém é possível e estimar a energia a ser produzida pelo sistema utilizando de modo a se utilizar estes dados em análises de viabilidade técnico-econômica como instrumentos de tomada de decisão para a instalação e replicação de sistemas fotovoltaicos. Por fim, a replicação do sistema fotovoltaico em instituições de ensino *multicampi* trará como benefício principal uma economia anual de cerca de 60% no consumo de energia elétrica, o que pode ser investido em outros setores prioritários da instituição. Ademais, tendo em vista a atividade fim das instituições de ensino, a instalação do sistema fotovoltaico e a replicação do sistema trará benefícios além da redução do consumo de energia elétrica, ao ser utilizado nas atividades de ensino, pesquisa e extensão.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Desempenho Operacional, Avaliação Econômica.

ABSTRACT

In February 2015, Ordinance No. 23/2015 of the Ministry of Planning, Budget and Management was published. It establishes good practices for the management and use of electricity and water in the organs and entities of the Federal Public Administration, such as the use of photovoltaic modules. When it comes to the universe of educational institutions, according to the Ministry of Education and Culture, they should be established as sustainable educational spaces by modernizing the buildings for efficient use of inputs and reduction of environmental impacts. On the other hand, it is possible to notice an increase in the number of photovoltaic systems installed in the state of Piauí and an increasing use of this energy source within the educational institutions. Thus, the following questions emerged from this research: How does the operational performance of photovoltaic systems installed in *multicampi* institutions in the state of Piauí occur? Can operational performance analysis be done if solar radiation data from sources other than those suggested by the standards are used? Is it possible to analyze replication possibilities of photovoltaic systems in *multicampi* teaching institutions, estimating the energy to be produced using such irradiation data? What benefits will the replication of photovoltaic systems bring to educational institutions? In this context, this research has as general objective to provide subsidies for managers of *multicampi* education institutions to analyze the technical-economic viability of the replication of photovoltaic systems, in order to avoid large margins of errors in the estimations of electricity generation. Through the analysis of the IFPI-FLORIANO System, object of study of this research, it was verified that photovoltaic systems installed in educational institutions can present excellent performances due to the great potential for the use of this source in the state. The system had a Final Yield of 1,493.12 kWh / kWp, a Capacity Factor of 17.04% and a Performance Ratio of 73.54%. It was also verified that it is not possible to analyze the operational performance data of global solar radiation collected through meteorological stations of the National Institute of Meteorology, but it is possible to estimate the energy to be produced by the system using such data in technical-economic feasibility analyzes as decision-making tools for the installation and replication of systems photovoltaic. Finally, the replication of the photovoltaic system in *multicampi* educational institutions will bring about an annual saving of about 60% in the consumption of electric energy, which can be invested in other priority sectors of the institution. In addition, in view of the end activity of educational institutions, the installation of the photovoltaic system and the replication of the system will bring benefits beyond the reduction of electric energy consumption, when used in teaching, research and extension activities.

Keywords: Photovoltaic Systems, Operational Performance, Economic Evaluation.

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1 – Estimativa da evolução do consumo mundial de energia até 2030.....	15
Figura 2 – Vista parcial do Sistema fotovoltaico instalado no <i>campus</i> Floriano do IFPI.	18
Figura 3 – Evolução do número de <i>campi</i> após a mudança de CEFET-PI para IFPI.	19
Figura 4 – Distribuição geográfica das unidades do IFPI.	19
Figura 5 – Componentes da Radiação Solar.....	26
Figura 6 – Adições anuais de energia solar fotovoltaica no mundo entre 2007 e 2017.	28
Figura 7 – Ranking dos 10 Países que mais adicionaram energia solar fotovoltaica em 2017.	29
Figura 8 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil, ano de 2017.	30
Figura 9 – Capacidade instalada das gerações distribuídas fotovoltaica e de biogás.....	31
Figura 10 – SFCR instalado no Bloco 8 do Centro de Tecnologia da UFPI.....	33
Figura 11 – Maior usina fotovoltaica da América Latina, com 292 MWp, em Ribeira do Piauí.	33
Figura 12 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.....	34
Figura 13 – Exemplo de configuração básica de um sistema fotovoltaico distribuído.	35
Figura 14 - Principais configurações de SFCR quanto à instalação dos inversores:.....	36
Figura 15 - Fatores de Capacidade comuns para alguns sistemas de geração de eletricidade no Brasil.....	38
Figura 16 – ENCE do módulo Canadian Solar CS6P-260P.....	48
Figura 17 – Disposição dos módulos fotovoltaicos sobre o telhado do campus e detalhe de cada arranjo.....	50
Figura 18 - Estação Automática PI_A311 do INMET, localizada em Floriano-PI.....	52
Figura 19 – Variação da Irradiação Global Horizontal para a Cidade de Floriano.	57
Figura 20 – Irradiação Solar Global incidente no plano horizontal na Europa (a) e na Alemanha (b).	58
Figura 21 – Mapa de radiação solar média diária do estado do Piauí.	59
Figura 22 – Geração mensal dos subsistemas que compõem o sistema fotovoltaico IFPI- Floriano.....	60
Figura 23 – Estimativas de Geração de energia calculadas, através da Equação 5, e fornecidas pelos <i>softwares</i>	61

Figura 24 – Irradiação solar no plano dos módulos calculada a partir do banco de dados do INMET.	68
Figura 25 – Irradiação solar no plano dos módulos para os demais bancos de dados.....	70
Figura 26 – Localização geográfica dos SFCR comparados na Tabela 16.	74
Figura 27 - Mapeamento da Irradiação Solar no Nordeste Brasileiro.	75
Figura 28 – Consumo mensal do <i>campus</i> e Geração do Sistema Fotovoltaico no primeiro ano de funcionamento.	76
Figura 29 - Evolução do Valor Presente Líquido durante a vida útil do projeto.....	78
Figura 30– Variação da Taxa SELIC e do reajuste da Tarifa de Energia no Piauí.	79
Figura 31 - Irradiação Solar Global para as cidades que compõem a amostra.....	82
Figura 32 - Evolução dos fluxos de caixa para os <i>campis</i> de Teresina (a) e Picos (b).....	83

LISTA DE TABELAS E QUADROS

	Páginas
Tabela 1 – Infraestrutura física do campus Floriano do IFPI.....	20
Tabela 2 – Perdas por captura encontradas para cada grupo.....	42
Tabela 3 - Fluxo de Caixa da situação hipotética.....	44
Tabela 4 – Especificações técnicas do módulo fotovoltaico utilizado.....	47
Tabela 5 – Especificações técnicas dos inversores SMA Sunny Tripower SIW500.....	49
Tabela 6 - Valores Tarifários para consumidor do grupo A4 faturado com Tarifa Verde.....	55
Tabela 7 - Resumo das estimativas de geração de energia em kWh e sua porcentagem em relação à geração real.....	62
Tabela 8 – Valores de Produtividade Final, em kWh/kWp, para o Sistema IFPI-FLORIANO.....	64
Tabela 9 – Valores médios de Produtividade Final, em kWh/kWp, estimados para cada região do Brasil.....	65
Tabela 10 – Valores de Produtividade Final, em kWh/kWp, para cada estimativa apresentada.....	65
Tabela 11 – Fator de Capacidade, em porcentagem (%), do sistema fotovoltaico IFPI-FLORIANO.....	66
Tabela 12 – Valores médios de Fator de Capacidade, em porcentagem (%), estimados para cada região do Brasil.....	66
Tabela 13 – Valores de Fator de Capacidade, em porcentagem (%), para cada estimativa apresentada.....	67
Tabela 14 – Desempenho Global do sistema fotovoltaico IFPI-FLORIANO calculado com dados do INMET.....	68
Tabela 15 - Valores de Desempenho Global de um SFCR de 3 kWp instalado em Curitiba. .	69
Tabela 16 – Desempenho Global do Sistema IFPI-FLORIANO calculado a partir dos demais bancos de dados.....	71
Tabela 17 - Desempenho Global calculado a partir das estimativas de geração de energia. ...	72
Tabela 18 – Comparativo entre sistemas instalados instituições públicas de ensino de locais distintos do Brasil.....	73
Tabela 19 – Análise de viabilidade econômica do Sistema IFPI-FLORIANO.....	77
Tabela 20 – Viabilidade Econômica das perdas evitáveis no CATCE do IFPI.....	79
Tabela 21 – Consumo, em kWh, dos <i>campi</i> do IFPI no ano de 2017.....	80

Tabela 22 - Consumo mensal, em kWh, dos <i>campi</i> que compõem a amostra selecionada no ano de 2017.	81
Tabela 23 - Resumo da análise de viabilidade econômica da replicação do sistema fotovoltaico.	82
Quadro 1 – Resumo das hipóteses de pesquisa, resultados e comentários.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO ₂	Dióxido de carbono
REN-21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
PDE	Plano Decenal de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
RN	Resolução Normativa
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SISGD	Sistema de Registro de Geração Distribuída
BIG	Banco de Informações de Geração
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
MPOG	Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão
MME	Ministério de Minas e Energia
MEC	Ministério da Educação e Cultura
PDI	Plano de Desenvolvimento Institucional
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
PVT	<i>Photovoltaic Thermal</i>
CPV	<i>Concentrating Photovoltaic</i>
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
Se	Selênio
c-Si	Silício cristalino
GaAs	Arseneto de Gálio
As	Arsênio
Ga	Gálio
Si	Silício
a-Si	Silício Amorfo
CdS	Sulfeto de Cádmiio
CdTe	Telureto de Cádmiio
CIS	Seleneto de Cobre e Índio
CIGS	Seleneto de Cobre, Índio e Gálio
EVA	Acetato de Vinil Etileno
PVF	Fluoreto de Polivinila
STC	<i>Standard Test Condition</i>

NOCT	<i>Normal Operation Cell Temperature</i>
SFI	Sistemas Fotovoltaico Autônomos ou Isolados
SFH	Sistemas Fotovoltaicos Híbridos
FUMDHAM	Fundação Museu do Homem Americano
CERON	Centrais Elétricas de Rondônia S.A
UFPI	Universidade Federal do Piauí
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno
PB	Tempo de Retorno ou <i>Payback</i>
RCB	Relação Custo benefício
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
UNED	Unidade de Ensino Descentralizada
ETFPI	Escola Técnica Federal do Piauí
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
LABSOL	Laboratório de Energia Solar
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
BCB	Banco Central do Brasil
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
UFTPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
CATCE	<i>Campus</i> Teresina-Central
GD	Geração Distribuída
GC	Geração Centralizada
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
EMA	Estação Meteorológica Automática
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
ABES	Atlas Brasileiro de Energia Solar

SUMÁRIO

	Páginas
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização	16
1.2 Motivação e justificativa	17
1.3 Problematização e Objetivos.....	22
2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	25
2.1 Radiação Solar	25
2.2 Aplicações da energia solar	26
2.3 Panorama da Energia Solar Fotovoltaica.....	27
2.3.1 Panorama Mundial	28
2.3.2 Panorama Nacional	29
2.3.3 Panorama Local.....	32
2.4 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede	34
2.5 Parâmetros de desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede	37
2.5.1 Fator de Capacidade	37
2.5.2 Produtividade Final do Sistema (<i>Final Yield</i>).....	39
2.5.3 Desempenho Global (<i>Performance Ratio</i>).....	40
2.5.4 Energia produzida por um SFCR	41
2.6 Análise de viabilidade econômica de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede..	43
2.6.1 Valor Presente Líquido.....	43
2.6.2 Taxa Interna de Retorno	45
2.6.3 <i>Payback</i>	45
2.6.4 Relação Custo-benefício	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 Caracterização do objeto de estudo.....	47
3.2 Análise do desempenho operacional do Sistema	50

3.3 Avaliação econômica da instalação do Sistema.....	54
3.4 Avaliação das oportunidades de replicação do Sistema	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Análise do recurso solar da cidade de Floriano-PI.....	57
4.2 Análise da energia gerada pelo Sistema IFPI-FLORIANO	60
4.3 Cálculo dos índices de mérito do Sistema IFPI-FLORIANO	63
4.3.1 Produtividade Final do Sistema (Yf)	64
4.3.2 Fator de Capacidade (FC).....	66
4.3.3 Desempenho Global (PR).....	67
4.3.4 Análise Comparativa	73
4.4 Análise de Viabilidade Econômica	75
4.5 Possibilidades de replicação do sistema	80
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA IFPI-FLORIANO	100

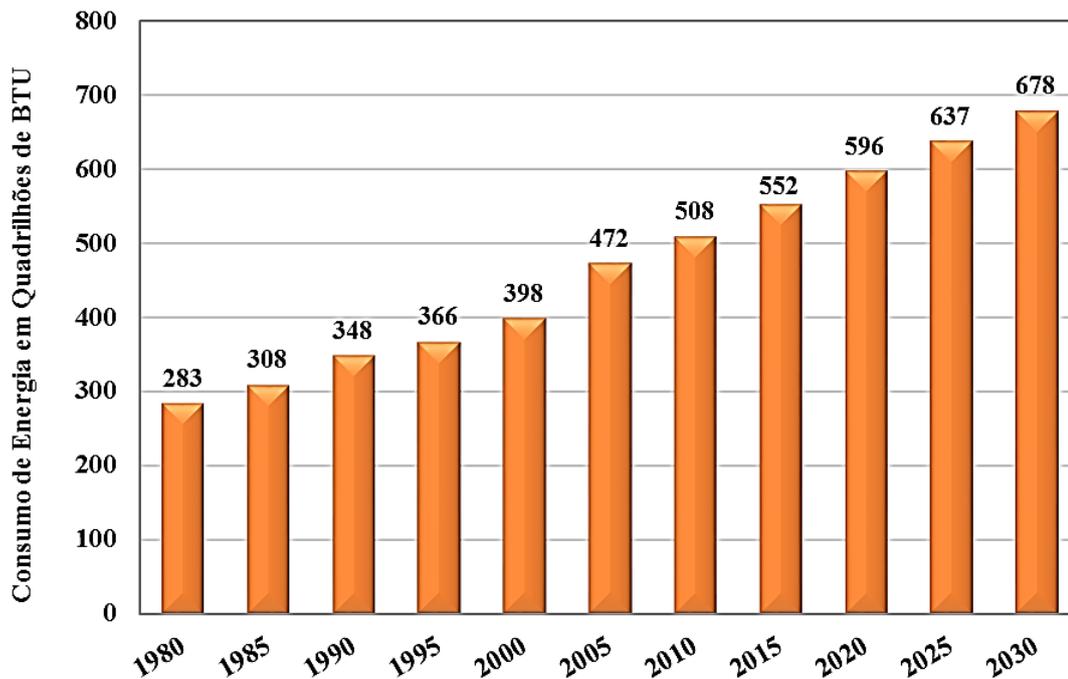
1 INTRODUÇÃO

A energia tem papel estratégico no crescimento econômico de qualquer nação, pois o acesso a este bem é uma das variáveis essenciais para se definir o nível de desenvolvimento da população. Neste sentido, a energia elétrica pode ser vista como uma infraestrutura que leva à cidadania (LIRA; MOITA NETO, 2013). Além disso, segundo Moraes (2013), proporciona ao ser humano variadas oportunidades e alternativas para a integração ao desenvolvimento, possibilitando o crescimento econômico, a qualidade de vida e o bem-estar social.

Entretanto, conforme afirmam Mpholo, Nchaba e Monese (2015), a maioria dos países em desenvolvimento ainda têm taxas de eletrificação muito baixas. Isso faz com que haja uma necessidade crescente de produção de energia para enfrentar desafios de acesso e demanda, a fim de acelerar o desenvolvimento e aumentar o padrão de vida.

Para Devabhaktuni *et al* (2013), é um fato conhecido que a demanda de energia aumenta a uma taxa proporcional ao crescimento econômico. Segundo o autor, entre 1980 e 2005, a população global aumentou em quase 2 bilhões de pessoas. Por conta disso, estima-se que o consumo mundial total de energia deverá aumentar em aproximadamente 44% no período entre 2005 e 2030, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Estimativa da evolução do consumo mundial de energia até 2030.



Fonte: EIA, 2009 *apud* Devabhaktuni et al, 2013.

1.1 Contextualização

Durante as últimas décadas, os níveis crescentes da demanda de energia tornaram-se uma fonte de preocupação. Esse crescimento trouxe consigo o aumento do uso de combustíveis fósseis e outros recursos naturais sobre os quais a humanidade depende para seu próprio desenvolvimento e bem-estar. Como consequência associada, surgiram os impactos sobre o meio ambiente, especificamente através dos danos ao ar, clima, água, terra e vida selvagem (PHILLIPS, 2013).

Devabhaktuni *et al* (2013) afirmam que apesar de várias iniciativas, políticas e investimentos para aumentar a capacidade de geração, o número de áreas não-eletrificadas nos países em desenvolvimento não mudou significativamente. Portanto, é extremamente importante criar a infraestrutura e instalar os recursos de geração de energia distribuída necessários para satisfazer as necessidades globais de energia.

Neste contexto, a demanda de energia em constante crescimento, o esgotamento rápido das fontes de energia convencionais e a preocupação com as questões ambientais, incentivaram a busca intensiva de novas formas de energia, mais eficientes e com tecnologia avançada (SINGH, 2013). Pois, já que a energia é essencial para o crescimento econômico de um país, mais importante do que simplesmente garantir seu fornecimento, é fazê-lo de maneira sustentável. Só assim, será possível vislumbrar a harmonia entre energia, economia e desenvolvimento sustentável (LIRA; MOITA NETO, 2013).

Neste cenário, as fontes renováveis de energia passaram a ter grande importância, tornando-se indispensáveis para o desenvolvimento de um sistema sustentável de geração de eletricidade (KHAN; ARSALAN, 2016). Algumas fontes renováveis de energia como a solar fotovoltaica, o vento, a biomassa, o biogás, a pequena hidrelétrica e a energia solar térmica, já vêm sendo amplamente utilizadas para gerar eletricidade em todo o mundo, reduzindo, assim, a pressão sobre os combustíveis fósseis e a poluição ambiental (GOEL; SHARMA, 2017).

Dentre as diversas fontes renováveis de energia, a solar fotovoltaica mostrou-se como uma das mais promissoras. É a única como tecnologia de geração de eletricidade que pode ser amplamente integrada aos diferentes tipos de edificações presentes no meio ambiente urbano. Além disso, as emissões de gases poluentes são muito menores do que as tecnologias convencionais de geração de eletricidade baseadas em combustíveis fósseis (DÁVI *et al*, 2016).

Sendo assim, com base em inovações tecnológicas recentes e amplas iniciativas de pesquisadores de todo o mundo, a energia solar naturalmente disponível mostrou um imenso potencial para atender às futuras demandas de energia do mundo (KHAN; ARSALAN, 2016).

Globalmente, os sistemas fotovoltaicos estão sendo instalados a uma taxa cada vez maior. A motivação para que os indivíduos instalem seu próprio sistema pode variar, mas grande parte do crescimento exponencial pode ser verificada em países com condições econômicas favoráveis, criadas através de políticas de governo (SOMMERFELDT; MADANI, 2017).

1.2 Motivação e justificativa

Em fevereiro de 2015, foi publicada a Portaria nº 23/2015 do Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG). O documento estabelece boas práticas de gestão e uso de energia elétrica e água nos órgãos e entidades da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dispõe sobre o monitoramento de consumo desses bens e serviços. Através desta portaria, o Governo determina, entre outras obrigações, que as entidades ligadas à União devem promover ações de eficiência energética e conscientização de usuários nas unidades consumidoras quanto ao uso correto de energia. Dentre as diversas práticas presentes em seu escopo, é estabelecido que deve ser priorizada a utilização de sistemas ou fontes renováveis de energia, como energia eólica e módulos fotovoltaicos que proporcionem economia no consumo anual de energia elétrica da edificação (MPOG, 2015).

Por outro lado, em se tratando do universo das instituições de ensino, de acordo com o Ministério da Educação e Cultura (MEC), as mesmas devem constituir-se como espaços educadores sustentáveis. Dentre outros objetivos, precisam elaborar mecanismos para a incorporação da Educação Ambiental nos currículos dos cursos de forma transversal, sensibilizando a comunidade acadêmica para as questões ambientais; consolidar um Sistema de Gestão Ambiental; além de modernizar as edificações para o uso eficiente dos insumos e redução dos impactos ambientais (MEC, 2012).

Nesse contexto, o primeiro sistema de minigeração fotovoltaica instalado em uma instituição pública de ensino no Estado do Piauí foi o sistema do *campus* Floriano do Instituto Federal do Piauí (IFPI), visto na Figura 2. Segundo Sá *et al* (2017), no ano de 2016 a Direção Geral do *campus* decidiu investir na instalação de um sistema fotovoltaico com intuito de atender parte da sua demanda de energia elétrica. O sistema foi implantado em maio de 2016, sendo composto por 660 módulos fotovoltaicos que ocupam aproximadamente 1.122 m² do telhado do *campus*, com uma potência nominal de 171,6 kWp.

Figura 2 – Vista parcial do Sistema fotovoltaico instalado no *campus* Floriano do IFPI.



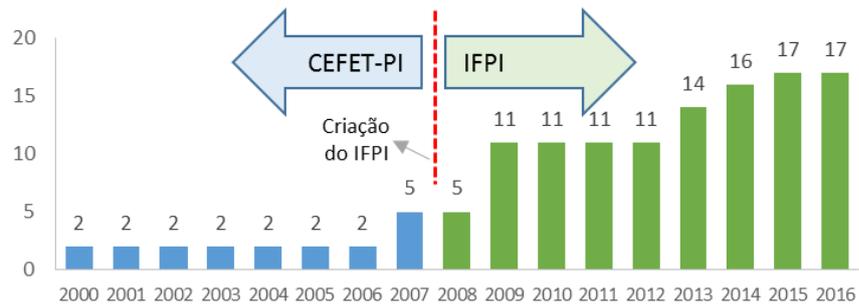
Fonte: IFPI, 2016.

Dessa maneira, o IFPI, por ser uma autarquia de regime especial de base educacional humanística, técnica e científica, que articula a educação superior básica e profissional, deve se adequar à portaria nº 23/2015 do MPOG. Além disso, a instituição tem como finalidades, dentre as diversas descritas no seu Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI), realizar e estimular a pesquisa aplicada, o desenvolvimento científico e tecnológico, além de promover a produção, o desenvolvimento e a transferência de tecnologias sociais, notadamente as voltadas à preservação do meio ambiente (IFPI, 2014).

Assim, além de estar de acordo com o que estabelece o PDI da instituição, a instalação do sistema fotovoltaico propicia a parte da adequação do IFPI à referida portaria e também alinha a instituição com as diretrizes de cunho ambiental e tecnológicas estabelecidas pelo MEC, principalmente no que diz respeito à energia solar fotovoltaica, que vem ganhando cada vez mais espaço dentro das instituições públicas de ensino.

O IFPI, com sede em Teresina, capital do Estado do Piauí, foi criado em 29 de dezembro de 2008 nos termos da Lei Federal nº 11.892, que transformou 38 unidades dos Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), em Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPI, 2014). Neste sentido, o IFPI pode ser caracterizado como uma instituição pública de ensino de caráter *multicampi*, pois teve grande expansão a partir do ano 2000 (MORAIS *et al*, 2016), como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Evolução do número de *campi* após a mudança de CEFET-PI para IFPI.



Fonte: Morais *et al.*, 2016.

Até o ano de 2008, os *campi* existentes eram apenas os *campi* Teresina Central, Teresina Zona Sul, Floriano, Picos e Parnaíba, sendo, portanto, os mais antigos da instituição desde a mudança de CEFET-PI para IFPI (IFPI, 2014). Atualmente, constitui-se de uma reitoria e 17 *campi* que estão distribuídos em 16 municípios do Estado do Piauí, distribuídos por toda sua extensão geográfica, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Distribuição geográfica das unidades do IFPI.



Fonte: IFPI, 2014.

Pode-se verificar na Figura 4 as seguintes unidades do IFPI: a Reitoria e dois *campi* em Teresina, e os demais *campi*: Angical, Campo Maior, Cocal, Corrente, Floriano, Oeiras, Parnaíba, Paulistana, Pedro II, Picos, Piri-piri, São João do Piauí, São Raimundo Nonato, Uruçuí, Valença do Piauí. Como parte do plano de expansão do Governo Federal, foram implantados três *campi* Avançados (José de Freitas, Pio IX e Teresina Dirceu) e um Centro de Referência em Programas e Projetos Especiais de Guadalupe.

O *campus* Floriano do IFPI está localizado no município de Floriano, no estado do Piauí. De acordo com Sá *et al* (2017), possui em torno de 80 professores, 62 técnico-administrativos, 39 servidores terceirizados e um total de 1.300 alunos, funcionando nos turnos da manhã, tarde e noite. Em termos de estrutura física conta com uma área total de aproximadamente 1 hectare distribuído entre salas de aula, laboratórios, refeitório, biblioteca, auditórios, áreas de esporte e áreas verdes, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Infraestrutura física do campus Floriano do IFPI.

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	ÁREA FÍSICA (m ²)
Auditório	01	186,80
Refeitório	01	112,97
Banheiro	22	227,31
Salas Administrativas	74	1.409,86
Sala para coordenação de curso	09	118,38
Sala de reunião	03	47,60
Quadra Poliesportiva	01	1.532,90
Sala de Professores	02	50,26
Biblioteca	01	497,10
Guarita	01	11,33
Auditório	01	80,00
Estacionamento	01	2.226,17
Garagem Institucional	01	400,00
Casa de leitura	01	54,60
Campo de Futebol	01	2.030,00
Quadra de Areia	01	496,00
TOTAL	121	9.481,41

Fonte: IFPI, 2014.

Uma vez que a geração de energia fotovoltaica passa a desempenhar um papel crescente na produção de eletricidade, torna-se cada vez mais importante monitorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos com o objetivo de avaliar a qualidade da operação durante seu ciclo de vida em termos de desempenho anual (DOLARA *et al*, 2012). De acordo com Roumpakia e Stamatelos (2017) existem vários modelos e métodos de análise de

desempenho destes sistemas na literatura recente. As diferenças entre os modelos estão relacionadas aos tipos de parâmetros de entrada, tipos de equipamentos de medição e tipos de operação, se conectados à rede ou não. Assim, existem três categorias principais para avaliação e previsão do desempenho dos sistemas: com base em dados de operação em tempo real, com base em medições na rede e com base em simulações.

Os parâmetros básicos para o monitoramento e análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos são estabelecidos na Norma 61724 da *International Electrotechnical Commission* (IEC). A análise desses indicadores, também conhecidos como índices de mérito, se faz importante porque através dela se pode comparar instalações fotovoltaicas de diferentes tamanhos, operando em climas diferentes e fornecendo energia para diferentes usos, de forma que os méritos relativos de diferentes projetos ou procedimentos operacionais se tornem evidentes (IEC, 1998).

Para que sejam calculados alguns índices de mérito a norma IEC 61724 afirma que são necessários os valores de irradiação solar incidente no plano dos módulos. Portanto, devem ser realizadas medições para a obtenção desses parâmetros, sendo que a irradiância deve ser obtida por meio de módulos de referência calibrados ou através de piranômetros. Vale a pena ressaltar que no sistema fotovoltaico instalado no *campus* Floriano do IFPI, não foi instalado nenhum sistema de monitoramento do recurso solar, conforme orienta esta normatização.

Avaliações precisas e consistentes do desempenho do sistema fotovoltaico são fundamentais para o desenvolvimento contínuo da indústria fotovoltaica. Para os fabricantes de componentes, as avaliações de desempenho são *benchmarks* de qualidade para produtos existentes. Para as equipes de pesquisa e desenvolvimento, são uma medida chave para ajudar a identificar as necessidades futuras. Para integradores de sistemas e clientes finais, são ferramentas vitais para avaliar a qualidade de produtos para orientar a tomada de decisão futura (MARION *et al*, 2005).

Outro aspecto importante a ser analisado diz respeito à viabilidade econômica da instalação de sistemas fotovoltaicos. De acordo com o último PDE, verifica-se que a tecnologia solar fotovoltaica ainda apresenta custos de implantação não competitivos com as demais fontes de geração centralizada, embora os patamares de preço no Brasil venham caindo com uma velocidade surpreendentemente alta. Para Dávi *et al* (2016), a combinação de tarifas residenciais elevadas com alta disponibilidade de radiação solar, são fortes indicativos de que a eletricidade fotovoltaica tem viabilidade econômica para instalações conectadas à rede em telhados.

Segundo Emmanuel, Akinyele e Rayudu (2017), a análise da viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos é crucial para melhorar a absorção da tecnologia fotovoltaica, já que as políticas de energia renovável favoráveis ainda se encontram em processo de evolução. Segundo o PDE 2017, espera-se que durante o horizonte decenal, os custos de implantação reduzam em cerca de 30% em relação aos patamares atuais, podendo chegar até a 40%, a exemplo do que já se observa em âmbito internacional.

Assim, a instalação de sistemas fotovoltaicos pode ser uma alternativa viável economicamente e um diferencial nas ações de economia de energia elétrica que devem ser adotadas pelas instituições de ensino, tendo em vista o grande potencial para a utilização desta fonte. Além disso, a análise dos parâmetros de desempenho do sistema pode ajudar na identificação de perdas relacionadas à produção de energia e ao funcionamento do sistema instalado. Logo, tendo em vista que a geração de energia elétrica através da tecnologia solar fotovoltaica tem muitas nuances a serem consideradas, faz-se necessário um estudo que envolva a análise global desta fonte para comprovar a viabilidade de instalação e expandir a sua utilização ainda mais dentro do universo das instituições de ensino.

1.3 Problematização e Objetivos

Diante o exposto, tendo em vista o grande potencial para a utilização de sistemas fotovoltaicos no estado do Piauí e a crescente utilização dessa tecnologia em instituições de ensino, surgem alguns questionamentos que norteiam esta pesquisa. Como se dá o desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos instalados em instituições públicas de ensino de caráter *multicampi* no estado do Piauí? Tendo em vista a inexistência de um sistema de monitoramento do recurso solar, conforme orienta a IEC 61724, no sistema instalado no *campus* Floriano do IFPI, a análise de desempenho operacional pode ser feita se forem utilizados dados de irradiação solar provenientes de outras fontes que não as sugeridas pela norma? É possível analisar possibilidades de replicação de sistemas fotovoltaicos nas instituições de ensino *multicampi*, estimando a energia a ser produzida utilizando tais dados de irradiação? Quais benefícios a replicação de sistemas fotovoltaicos trará para as instituições de ensino?

De acordo com Magalhães, Soares e Lira (2016), o estado do Piauí possui um grande potencial para obtenção de energia através de fontes renováveis, como a energia solar. Esse potencial se deve à sua localização próxima ao Equador, o que o torna uma região privilegiada de radiação solar. Galvão (2018) analisou e comparou o desempenho de sistemas fotovoltaicos em regiões distintas do estado do Piauí. Segundo a autora, o estado possui valores

de radiação bem acima da média global e concentra em seu território áreas consideradas as de maiores irradiações médias do País. Dessa maneira, a primeira hipótese investigada é que sistemas fotovoltaicos instalados em instituições públicas de ensino de caráter *multicampi* apresentem bons desempenhos operacionais que se traduzem através dos índices de mérito com valores satisfatórios.

Antoniolli (2015) avaliou a situação de alguns sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados pelo país através do desempenho de uma amostra de dez desses sistemas, analisando dados de irradiação solar e geração fotovoltaica. Alguns desses sistemas possuíam valores registrados utilizando uma célula de referência e outros tiveram que usar como base o valor medido por estações próximas, ou bancos de dados simulados. Segundo o autor, as diferenças mensais entre valores de irradiação que derivam de bancos de dados e valores medidos são muito expressivas. Assim, caso o projetista ou pesquisador fosse projetar um sistema e simulasse a geração através dos bancos de dados estimados, os valores calculados para a energia estariam superestimados em relação ao valor real gerado pelo sistema.

A segunda hipótese levantada é que a utilização de dados de irradiação solar global horizontal medidos através de estações meteorológicas próximas do local de instalação do sistema, é possível estimar a geração anual de energia elétrica mês a mês, através da metodologia de cálculo tradicional para sistemas fotovoltaicos, com valores mais precisos caso se utilizasse de bancos de dados de irradiação solar e *softwares* dedicados. Assim será possível estimar a produção de um sistema e determinar sua viabilidade técnico-econômica.

Tonin (2017) analisou o desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos conectados à rede na cidade de Curitiba, através da avaliação dos índices de mérito a partir dos dados de geração de energia elétrica e dos dados de irradiação solar. Os resultados encontrados pela autora confirmam a aplicabilidade no ambiente urbano – em empresas, universidades, residências particulares – da geração fotovoltaica distribuída. Por fim, a última hipótese a ser investigada é que além dos benefícios trazidos para as instituições de ensino, decorrentes da economia de energia e da conseqüente redução de custos, a replicação de sistemas fotovoltaicos também trará benefícios adicionais para o país e para o planeta.

Neste sentido, esta pesquisa tem como Objetivo Geral fornecer subsídios para os gestores das instituições de ensino de caráter *multicampi* analisarem a viabilidade técnico-econômica da replicação de sistemas fotovoltaicos, de modo a evitar grandes margens de erros nas estimativas de geração de energia elétrica. Para que este objetivo seja alcançado, foram traçados os seguintes Objetivos Específicos:

1. Analisar o desempenho operacional do sistema instalado no *campus* Florianiano do IFPI através dos índices de mérito: Produtividade Final, Fator de Capacidade e Desempenho Global;
2. Comparar as estimativas de geração fornecidas pelos *softwares* dedicados Solergo e PVsyst e as estimativas calculadas utilizando dados de irradiação solar provenientes do banco de dados do Projeto SWERA, da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar e dados de medição fornecidos pelo INMET, com os dados reais de geração do sistema instalado no *campus* Florianiano do IFPI;
3. Verificar a viabilidade econômica do sistema instalado no *campus* Florianiano do IFPI e de oportunidades de replicação do sistema em outros *campi* da instituição como uma medida de eficiência energética.

Dessa forma, esta pesquisa tem um caráter interdisciplinar por envolver questões de planejamento referentes a Engenharia, Economia e Gestão Ambiental, além de um caráter técnico por ser um processo que visa o fornecimento de ferramentas necessárias para tomadas de decisão. Finalmente, ao tempo que propõe uma análise sistêmica, poderá estimular rotinas administrativas visando a execução da metodologia proposta nesta pesquisa em qualquer instituição de ensino *multicampi* que deseje instalar e replicar sistemas fotovoltaicos.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Este capítulo é destinado a execução de uma revisão bibliográfica, a qual pretende explicar conceitos fundamentais que serão utilizados ao longo da dissertação com o intuito de compreender o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos para geração de eletricidade e algumas aplicações dessa tecnologia. Também são apresentados os principais parâmetros utilizados para a avaliação operacional e monitoramento de sistemas fotovoltaicos, além das principais métricas utilizadas em estudos econômicos de sistemas fotovoltaicos.

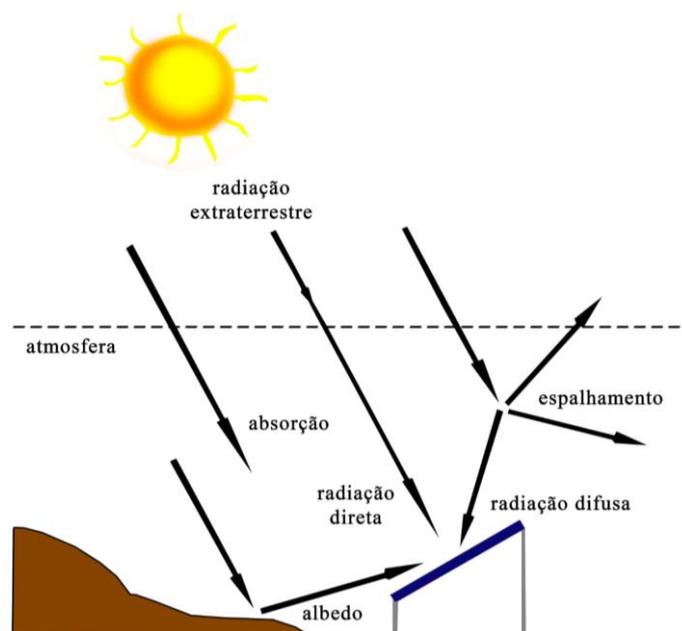
2.1 Radiação Solar

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética sendo responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra (PINHO; GALDINO, 2014). Sob sua influência estão os movimentos dos ventos e marés, o ciclo da água, a fotossíntese das plantas e até mesmo a existência dos combustíveis fósseis (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

A energia produzida no Sol torna-se radiação eletromagnética, também chamada de Radiação Solar, que se propaga no espaço até chegar a atmosfera terrestre. Apenas algo em torno da metade da radiação solar atinge a superfície da Terra, sendo absorvida quase que totalmente. Grande parte da radiação ultravioleta é absorvida pelo oxigênio, nitrogênio e ozônio presentes na atmosfera superior do planeta. Uma parte da radiação infravermelha é seletivamente absorvida pelo vapor de água e pelo CO₂ da atmosfera inferior, e então irradiada de volta para a Terra ou para o espaço. Sendo assim, a radiação solar que chega à superfície é composta de um feixe direto do Sol, de uma componente difusa e de uma componente refletida a partir do solo (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2016).

A Radiação Direta é aquela que atinge a superfície da terra sem sofrer nenhum desvio. Já a Radiação Difusa chega à superfície em diversas direções por conta da presença de nuvens ou outras alterações causadas pela atmosfera. A soma dessas duas componentes dá origem à Radiação Total ou Global (BORGES NETO; CARVALHO, 2012). Se a superfície estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente ao seu entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.) denominada Albedo (PINHO; GALDINO, 2014). Na Figura 5 podem ser vistas as principais componentes da Radiação Solar.

Figura 5 – Componentes da Radiação Solar.



Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

Vale a pena ressaltar que o termo Radiação Solar é usado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de potência por unidade de área, quando é especificamente denominada de Irradiância Solar, ou em termos de energia por unidade de área, denominada, então, de Irradiação Solar ou Insolação, sendo obtida através da integração da irradiância durante um determinado intervalo de tempo, normalmente uma hora ou um dia (PINHO; GALDINO, 2014). A Irradiância é expressa em unidade de W/m^2 (watt por metro quadrado). Já a Irradiação, tem como unidade o Wh/m^2 (watt-hora por metro quadrado).

A quantidade de radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é de aproximadamente $1.360 \text{ W}/\text{m}^2$. Esse número é denominado constante solar e varia minimamente durante o tempo. Já a radiação recebida em um determinado local da superfície terrestre pode variar entre 0 e $1.050 \text{ W}/\text{m}^2$, dependendo da latitude, da estação do ano, do horário do dia e do grau de nuvens presentes (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2016).

2.2 Aplicações da energia solar

A energia solar vem sendo a melhor opção para o futuro, dentre as principais fontes de energia renováveis, devido a vários motivos. Primeiro, a energia solar é a fonte de energia mais abundante na natureza, é livremente disponível e sem custo. Em segundo lugar, é uma fonte promissora de energia porque proporciona eficiências de produção sólidas e crescentes

em relação às outras fontes de energia. E por fim, a utilização da energia solar tem poucos impactos nocivos ao ecossistema (KANNAN; VAKEESAN, 2016). A maioria dos impactos da fonte solar fotovoltaica está relacionada com a produção das células fotovoltaicas. A produção do silício metalúrgico gera impactos desde a fase de extração até a fase de fabricação. Durante a fase de purificação do silício ocorre a liberação de gases tóxicos e de efeito estufa na atmosfera (SILVA; SHAYANI; OLIVEIRA, 2018).

Seu uso geralmente é dividido em duas áreas principais: como fonte de energia térmica e geração de eletricidade (SINGH, 2013). Sistemas que utilizam a Energia Solar Térmica, capturam a energia solar para uso em processos de produção de calor, e os sistemas de Energia Solar Fotovoltaica (FV) utilizam de células solares para gerar eletricidade diretamente através do efeito fotovoltaico (BARLEV; VIDU; STROEVE, 2011).

A energia solar fotovoltaica vem ganhando destaque, por ser a tecnologia renovável mais simples para projetar e instalar (EL CHAAR; LAMONT; EL ZEIN, 2011). Além disso, é a maneira mais útil de usar a energia do Sol, convertendo-a diretamente em eletricidade (TYAGI; KAUSHIK; TYAGI, 2012). Os módulos fotovoltaicos, são construídos a partir de dispositivos semicondutores de estado sólido. Tais equipamentos podem ser montados no chão, no telhado ou, até mesmo nas paredes de uma edificação (DEVABHAKTUNI *et al*, 2013).

Daí vem sendo utilizada em diversas aplicações tais como: fonte de energia para bombeamento de água, alimentação de instalações remotas, sistemas domésticos solares, telecomunicações, satélites e veículos espaciais, em residências urbanas, grandes usinas, entre outras, que fazem com que a demanda por energia solar fotovoltaica aumente ainda mais a cada ano (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011).

2.3 Panorama da Energia Solar Fotovoltaica

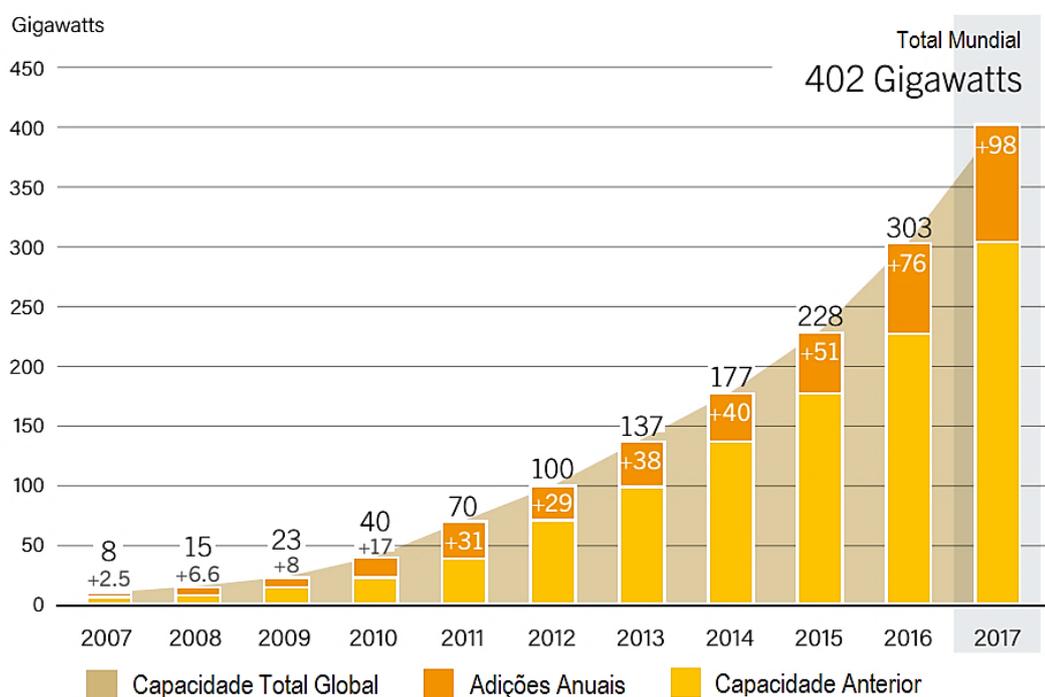
O uso da energia fotovoltaica esteve inicialmente voltado às aplicações espaciais. Posteriormente, a tecnologia passou a ser alternativa para o atendimento de locais isolados, funcionando em conjunto com baterias. No século XXI observou-se um grande salto na utilização desta tecnologia, tanto de forma distribuída, quanto centralizada (TOLMASQUIM, 2016). Os sistemas de Geração Distribuída (GD) funcionam de maneira oposta ao que é usual. A GD é caracterizada por unidades consumidoras que instalam pequenos sistemas de geração junto às cargas, que permanecem conectadas ao sistema da própria rede de distribuição. Quando a potência gerada é superior à potência consumida, as unidades consumidoras passam a se comportar como pequenas usinas injetando a energia excedente na rede, invertendo, assim, o

fluxo de potência original. Em contrapartida, no modelo usual, também conhecido como Geração Centralizada (GC), são construídas grandes usinas distantes dos centros de carga. Dessa maneira, a GC é caracterizada por extensas linhas de transmissão e distribuição que conectam as usinas aos centros de carga, e pelas grandes áreas necessárias para a implantação e operação das usinas (CAMARGOS, SHAIANY, OLIVEIRA, 2016).

2.3.1 Panorama Mundial

De acordo com as estatísticas apresentadas no último relatório da *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* (REN-21, 2018), o ano de 2017 foi um marco para a energia solar fotovoltaica. O mundo adicionou mais capacidade de energia solar fotovoltaica do que de qualquer outro tipo de tecnologia de geração de energia. Em 2017, pelo menos 98 GW de capacidade fotovoltaica solar foram instalados aumentando a capacidade total em quase um terço, para um total de aproximadamente 402 GW, como pode ser visto na Figura 6.

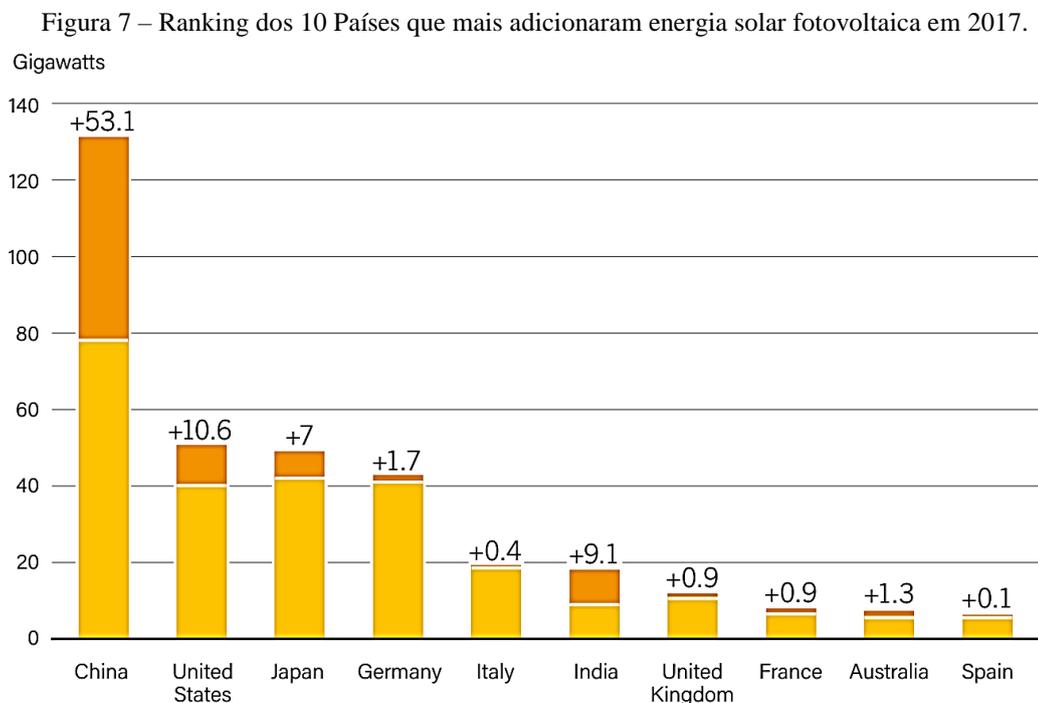
Figura 6 – Adições anuais de energia solar fotovoltaica no mundo entre 2007 e 2017.



Fonte: REN-21, 2018.

No ano de 2015, a China passou a liderar a capacidade total instalada de energia solar fotovoltaica com 43,5 GWp, seguida pela Alemanha com 39,7 GWp, Japão com 34,4 GWp, EUA com 25,6 GWp e Itália com 18,9 GWp (NASCIMENTO, 2017). Em 2017, a China superou todas as expectativas, adicionando mais capacidade fotovoltaica solar (mais de 53 GW)

do que foi adicionado em todo o mundo em 2015 (51 GW), como pode ser visto na Figura 7. Pela primeira vez, a energia solar fotovoltaica foi a principal fonte de nova capacidade de energia da China (REN-21, 2018).



Fonte: REN-21, 2018.

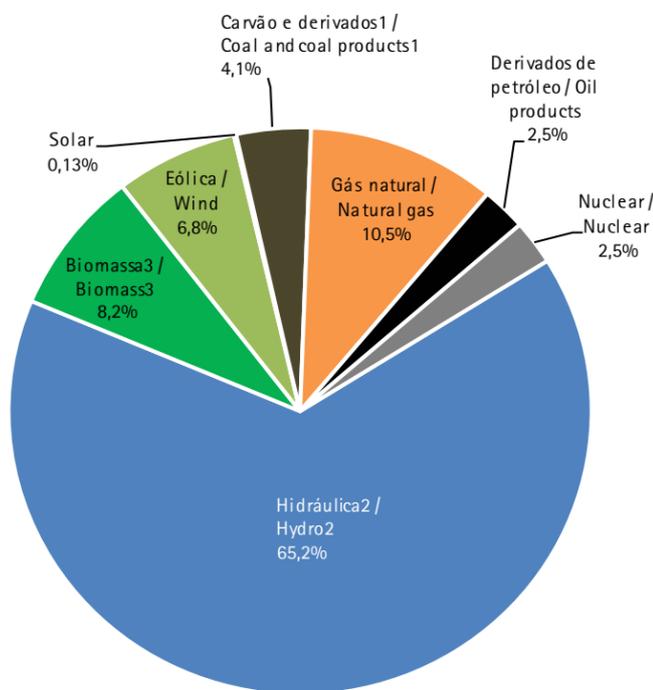
Segundo Silva (2015), dentre os principais fatores que vêm contribuindo para a aceleração do crescimento da fonte solar na parcela da matriz energética mundial estão o apelo mundial por energias limpas e o barateamento dos equipamentos necessários para a geração em decorrência do crescimento dos investimentos do setor público e privado, e também devido ao aumento dos preços da energia elétrica, tornando-a mais competitiva.

2.3.2 Panorama Nacional

De acordo com os dados do último Balanço Energético Nacional (BEN), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 65,2% da oferta interna (EPE, 2018), como pode ser visto na Figura 8. Segundo Tolmasquin (2016), esta tem sido a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro por várias décadas, tanto pela sua competitividade econômica quanto pela abundância deste recurso energético a nível nacional. Além disso, trata-se de uma tecnologia

madura e confiável que, no atual contexto de maior preocupação com as emissões de gases de efeito estufa, apresenta a vantagem adicional de ser uma fonte renovável de geração.

Figura 8 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil, ano de 2017.



Fonte: EPE, 2018.

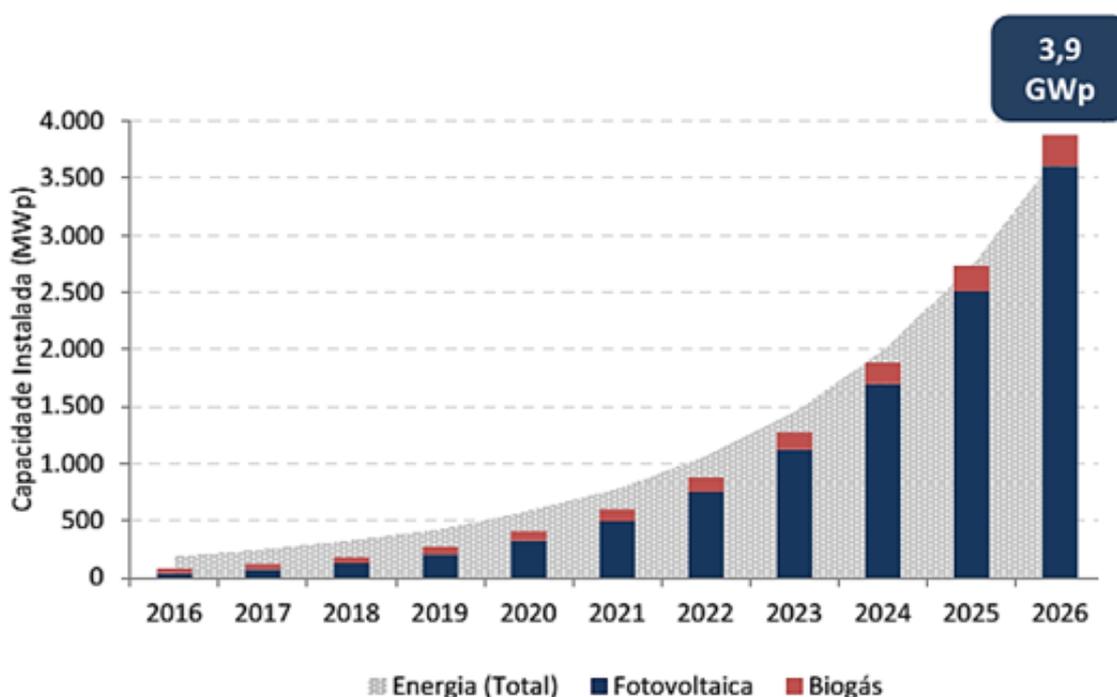
No Brasil, a energia solar fotovoltaica ainda é uma forma de energia sub representada, considerando as condições de irradiação solar do país. Inicialmente, seu uso englobava, em sua maioria, sistemas isolados em pequena escala em áreas sem conexão com o Sistema Interligado Nacional (SIN) (HOLDERMANN; KISSEL; BEIGEL, 2014). No entanto, a quantidade de instalação de sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil veio a crescer nos últimos anos. Isso se deu principalmente após a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que padronizou a inclusão da energia fotovoltaica na matriz energética brasileira, através das modalidades de micro e minigeração distribuídas (ANEEL, 2012).

A resolução permitiu aos consumidores brasileiros o direito de instalar sistemas fotovoltaicos, divididos em duas categorias: micro e minigeração distribuída. A aprovação desta resolução foi um marco no setor energético brasileiro, pois colocou o Brasil no grupo de países que incentivam e apoiam a autoprodução de energia elétrica por cidadãos, empresas e instituições que desejam suprir seu consumo de energia a partir de sistemas fotovoltaicos operando em paralelismo com a rede pública (VILLALVA, 2015). Outro marco importante

para a energia fotovoltaica no Brasil ocorreu em 2015, com a publicação da RN nº 687/2015 da ANEEL, que alterou a resolução anterior e estabeleceu condições e facilidades para a utilização da geração distribuída, para os anos seguintes. Com esta atualização, a potência permitida para a microgeração, que era de até 100 kW, passou a ser 75 kW, e para a minigeração, que era permitida de 100 kW a 1 MW, passa a valer de 75 kW a 5 MW (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015).

Assim, como consequência destas ações regulatórias combinadas com os avanços na tecnologia fotovoltaica, verificou-se um aumento significativo da geração distribuída no Brasil, principalmente na área de sistemas conectados à rede elétrica (VALE *et al*, 2017). De acordo com o último Plano Decenal de Energia (PDE 2016-2026), publicado pela Empresa Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia (MME), estimam-se cerca de 770 mil adotantes de sistemas fotovoltaicos sob o regime da RN nº 482/2012, totalizando 3,3 GWp, suficiente para atender 0,6% do consumo total nacional, em 2026 (EPE, 2016b), como pode ser visto na Figura 9.¹

Figura 9 – Capacidade instalada das gerações distribuídas fotovoltaica e de biogás.



Fonte: EPE, 2017b.

Observa-se que a partir das regulamentações, a adoção de sistemas de geração própria no Brasil teve um início tímido, mas começou a se popularizar. Em 2016, houve um salto de mais de quatro vezes no número de instalações, terminando o ano com 81 MW

¹ Adicionalmente, é considerada no PDE 2016-2026 a contribuição de sistemas a biogás de pequeno porte.

instalados, distribuídos em 7,7 mil unidades (EPE, 2016b). Em 2016, a micro e a mini geração distribuída atingiram 359,15 GWh com uma potência instalada de 246,1 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 165,87 GWh e 174,5 MW de geração e potência instalada respectivamente (EPE, 2018). Assim, os desafios existentes no Brasil no que tange à energia solar fotovoltaica vêm sendo superados lentamente, mostrando uma evolução no setor nos últimos anos, mas ainda existem alguns desafios que devem ser vencidos para que esta fonte de energia renovável seja implantada com menores obstáculos (ROSA; GASPARIN, 2016).

2.3.3 Panorama Local

Com relação ao cenário local, Ferreira Neto *et al* (2016) apresentam em sua pesquisa dados coletados junto a concessionária Eletrobrás Distribuição Piauí sobre o crescimento do número de unidades geradoras fotovoltaicas em funcionamento no estado do Piauí. De acordo com os autores, o estado possuía até o final de 2015 apenas 12 sistemas de microgerações, sendo que esta era a única modalidade de geração distribuída utilizada no estado. Porém, somente nos cinco primeiros meses de 2016 foram conectadas mais 40 unidades totalizando 52 microgerações até o mês de maio de 2016. Isso significou um crescimento de mais de 300% em apenas cinco meses e trouxe, como resultado, um acréscimo de 745,85 kWp à geração distribuída do Piauí, que passou a ter um acumulado total de 894,17 kWp de potência instalada.

Ademais, em consulta ao Sistema de Registro de Geração Distribuída (SISGD), disponível no site da ANEEL, verifica-se que o estado do Piauí conta com 409 unidades consumidoras com sistemas fotovoltaicos (tanto mini quanto micro geração) em operação², o que corresponde a uma potência instalada de 7.663,53 kW. Vale a pena ressaltar que no Brasil, são 40.521 sistemas instalados totalizando 501.324,42 kW de potência. Ainda, em consulta ao Banco de Informações de Geração (BIG) fornecido pela ANEEL, verifica-se que no ano de 2018, no Piauí, encontram-se em operação as centrais de geração fotovoltaicas de Nova Olinda, Sertão 1 e Sobral 1. Além destas, está prevista a construção das Usinas de São Gonçalo e São João do Piauí, que juntamente com as anteriores acrescentarão cerca de 700 MW de potência ao estado (ANEEL, 2018).

Como exemplo de SFCR instalado no Piauí, além do sistema fotovoltaico de minigeração instalado no *campus* Floriano do IFPI, tem-se o sistema fotovoltaico de

² Consulta realizada no dia 04/10/2018.

microgeração instalado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Piauí (UFPI), visto na Figura 10. O sistema é composto por 114 módulos fotovoltaicos de 320 Wp divididos em seis *strings* com 19 módulos conectados em série, o que perfaz uma potência instalada de 36,48 kW (MORAIS *et al*, 2017).

Figura 10 – SFCR instalado no Bloco 8 do Centro de Tecnologia da UFPI.



Fonte: Moraes *et al*, 2017.

Além dos sistemas de geração distribuída, o estado já conta com grandes usinas fotovoltaicas. Na Figura 11 pode ser visto o Parque Solar Nova Olinda no Estado do Piauí, com potência instalada de 292 MWp, localizado na cidade de Ribeira do Piauí. O sistema conta com 930 mil módulos fotovoltaicos e ocupa uma área de aproximadamente 690 hectares. Atualmente é o maior parque solar da América Latina (TEIXEIRA, 2017).

Figura 11 – Maior usina fotovoltaica da América Latina, com 292 MWp, em Ribeira do Piauí.



Fonte: Portal Energia, 2016.

Logo, analisando esse contexto, é possível notar um crescimento considerável na produção de energia solar fotovoltaica no estado do Piauí, passando de fonte de uso para

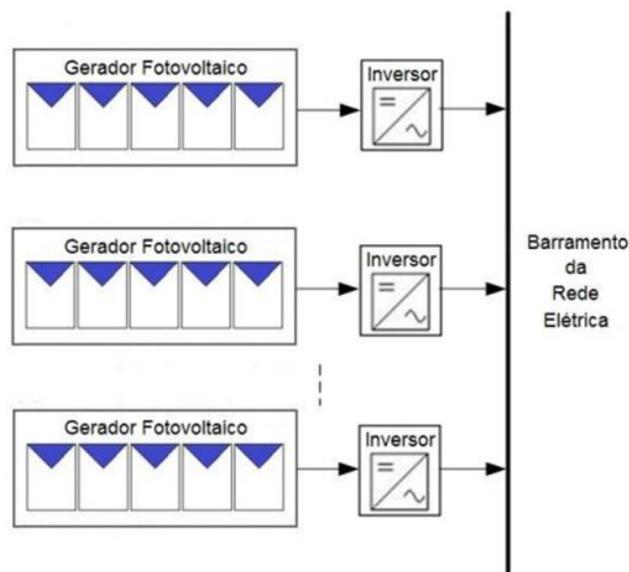
pequenas escalas de energia para uma fonte com grande potência instalada no estado (MAGALHÃES; SOARES; LIRA, 2016).

2.4 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Os SFCR constituem a aplicação de energia solar fotovoltaica que apresentam maior expressão em vários locais do mundo. Uma das principais vantagens da utilização desses sistemas é a possibilidade de integra-los à arquitetura das edificações, possibilitando o aproveitamento do recurso solar disponível para a geração de eletricidade no próprio local de consumo (MACÊDO, 2006).

Os SFCR, em sua grande maioria, dispensam o uso de acumuladores, pois a energia por eles gerada pode ser consumida pela carga ou injetada diretamente à rede elétrica, sendo a mesma compensada no consumo de energia elétrica ativa da edificação (TELES, 2017). Estes sistemas utilizam um grande número de módulos fotovoltaicos, e todo o arranjo é conectado em inversores e logo em seguida guiados diretamente à rede (JUCÁ; CARVALHO, 2013). A configuração básica de um SFCR é mostrada na Figura 12.

Figura 12 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

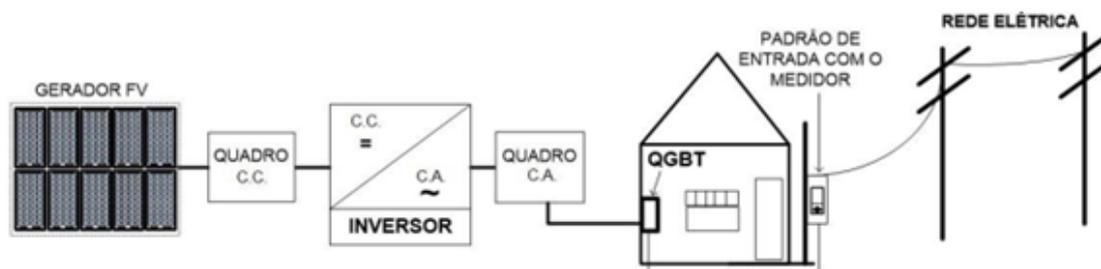


Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

Os SFCR em edificações são essencialmente constituídos por um gerador fotovoltaico, um conversor CC/CA (inversor) e um ponto de acoplamento comum, geralmente um Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), como pode ser visto na Figura 13. Essa

configuração permite um intercâmbio de energia entre o SFCR e a rede elétrica, proporcionando um atendimento continuado, sem a necessidade de baterias (MACÊDO, 2006).

Figura 13 – Exemplo de configuração básica de um sistema fotovoltaico distribuído.



Fonte: Teles, 2017.

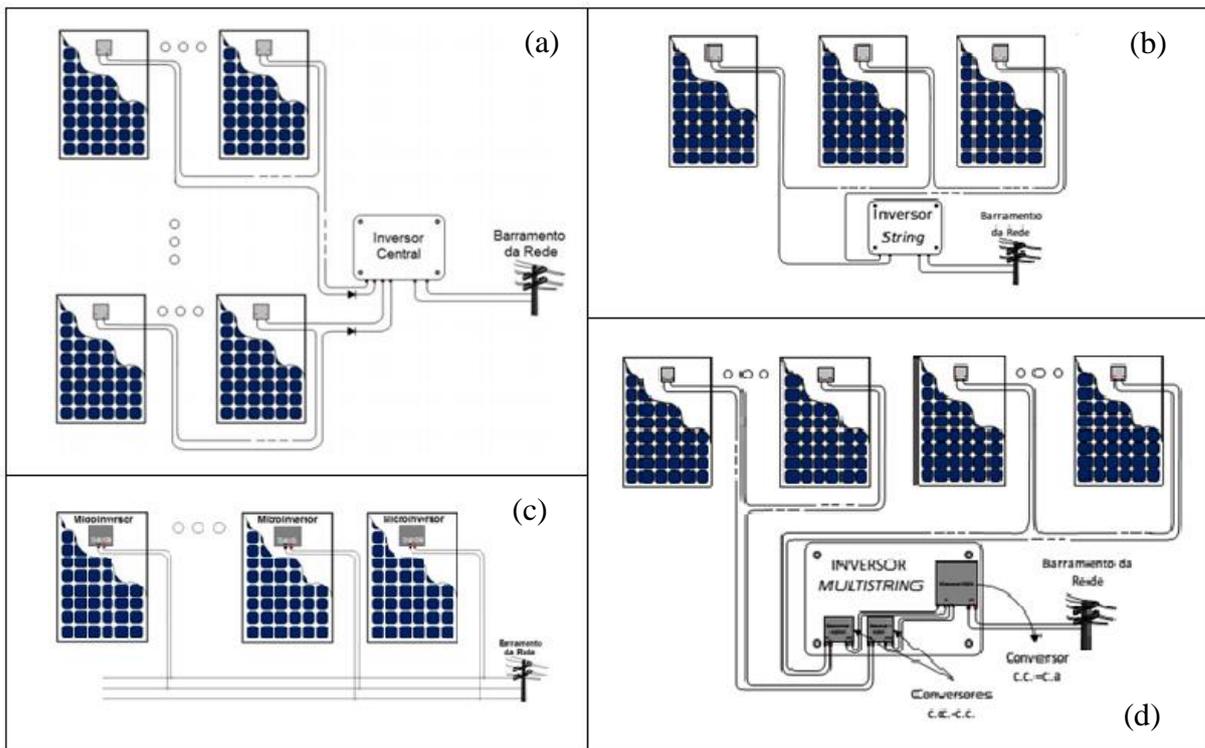
Segundo Teles (2017) existem diferentes configurações de agrupamento dos geradores FV que compõem um SFCR. As arquiteturas mais utilizadas podem ser agrupadas basicamente nas cinco seguintes configurações de inversor: a) Inversor centralizado, b) Inversor *String*, na qual é feita a interligação de uma cadeia de módulos FV associados em série a cada inversor, c) Inversor *Multistring*, que permite o uso de *strings* com diferentes números de módulos; d) Microinversores que são conectados a cada módulo, maximizando sua energia e depois invertendo-a para alimentar a rede. Na Figura 14 podem ser vistas essas configurações utilizadas em SFCR.

Em Sistemas com configuração Inversor centralizado (Figura 14a), os geradores FV são formados por cadeias de módulos ligados em série e apenas um inversor é utilizado para fazer a interface com a rede elétrica, no qual todas as séries são ligadas em paralelo (TELES, 2017). A principal vantagem dessa configuração é a redução de custos, enquanto a desvantagem está na baixa confiabilidade, pois, no caso de falhas no inversor, grande parte da instalação fica comprometida, (ALMEIDA, 2012). Apesar das desvantagens mencionadas, essa arquitetura possui a vantagem de proporcionar o menor custo por potência instalada e uma maior simplicidade (PAVAN *et al.*, 2007). Vale a pena ressaltar que esta configuração é a mais usada na comunidade Europeia, com aproximadamente 80% do mercado (AMBO; IKAWA; INZUNZA, 2010).

Segundo Teles (2017), a tecnologia de inversores *String* (Figura 14b), demonstra um dos avanços tecnológicos para resolver os problemas da concepção centralizada. Ela se baseia na interligação de uma cadeia de módulos FV associados em série a cada inversor, que por isso é caracterizado como sendo do tipo *string*. Almeida (2012) afirma que essa

configuração elimina ligações em paralelo, diminui as perdas ocasionadas por sombreamento e permite utilizar em um mesmo sistema fotovoltaico séries FV com orientações diferentes, propiciando um aumento da eficiência energética e da confiabilidade do sistema. Segundo o autor, a principal desvantagem é o aumento dos custos, uma vez que é necessário um maior número de inversores de menor potência.

Figura 14 - Principais configurações de SFCR quanto à instalação dos inversores:
Inversor Central (a), Inversor *String* (b), Microinversor Integrado (c) e Inversor *Multistring* (d).



Fonte: Adaptado de Teles, 2017.

Um módulo CA, é uma combinação de um módulo fotovoltaico e um microinversor integrado (Figura 14c) que converte a potência CC do módulo em potência CA e a injeta na rede elétrica convencional. O inversor é instalado na parte posterior do módulo, ou sobre a estrutura de suporte, próximo do mesmo. Integrando-se cada módulo FV diretamente a um microinversor, é possível minimizar as perdas devido à dispersão de parâmetros do módulo ou os efeitos de uma iluminação não uniforme do gerador FV (MACÊDO, 2006). Na estrutura *multistring*, mostrada na Figura 14d, existe um rastreador do ponto de máxima potência associado a cada sequência de módulos FV em série. Para isso um conversor c.c.-c.c. é implementado para cada *string* e a potência resultante de cada série é entregue a um único barramento c.c. que está conectado a um único estágio de conversão c.c.-c.a.. O inversor

multistring é útil quando as séries de diferentes potências nominais e diferentes orientações são combinadas (TELES, 2017).

2.5 Parâmetros de desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

A avaliação de desempenho de um sistema fotovoltaico pode ser feita através da apuração de índices de mérito que representam as características desse sistema fotovoltaico de acordo com o seu desempenho frente à conversão de energia e são regulamentados pela *International Electrotechnical Commission* (IEC), através da norma IEC 61724 (TELES, 2017). Segundo Marion *et al* (2005), alguns parâmetros de desempenho podem ser usados para definir o desempenho geral do sistema em relação à produção de energia, ao recurso solar e ao efeito geral das perdas do sistema, que são a Produtividade Final e o Desempenho Global, e o Fator de capacidade

Segundo Benedito (2009), índices de desempenho, ou figuras de mérito, permitem verificar se um determinado sistema fotovoltaico está produzindo energia de forma otimizada ou se deve ser reconfigurado para aproveitar ao máximo o recurso solar disponível. Além disso, de acordo com Torres (2016), esses índices também podem ser utilizados para comparar a operação de sistemas fotovoltaicos em diferentes configurações, tecnologias e localizações. A seguir serão apresentadas as principais figuras de mérito utilizadas em análises de desempenho de sistemas fotovoltaicos.

2.5.1 Fator de Capacidade

O Fator de Capacidade, representado por FC , é um índice de mérito geralmente utilizado em usinas de geração de energia elétrica. Representa o nível de atividade de um sistema de geração em um determinado período através da relação entre a energia efetivamente produzida e a produção que teria, funcionando em sua capacidade nominal durante esse mesmo período (NAKABAYASHI, 2015). O Fator de Capacidade pode ser calculado através da Equação 1, que relaciona a energia gerada em um determinado período de tempo ($t_2 - t_1$) com a energia gerada na potência nominal da unidade geradora.

$$FC = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{P_G^0 \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{E}{P_G^0 \cdot (t_2 - t_1)} \quad \text{Eq. 1}$$

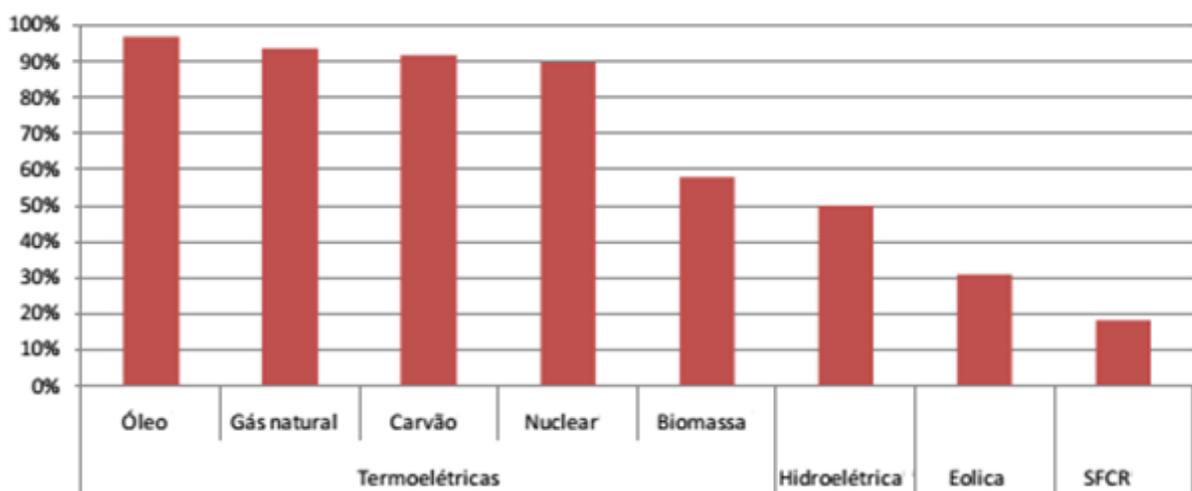
em que $P(t)$ é a potência instantânea gerada pelo sistema, P_G^0 é a potência instalada da unidade geradora e E é a energia entregue pelo sistema.

Esse conceito tem sido usado não só para o estudo de desempenho de usinas hidrelétricas e termelétricas, mas também para sistemas que utilizam como fonte primária de energia as energias solar e eólica. No caso específico da energia solar fotovoltaica, essa adaptação se dá tornando a potência nominal do gerador usado nas grandes usinas hidrelétricas ou termelétricas, igual à potência nominal do gerador fotovoltaico ($P_G^0 = P_{FV}^0$). Pode-se observar que o Fator de Capacidade pode ser aplicado para qualquer intervalo de tempo, permitindo uma análise sazonal da operação do sistema (ZILLES *et al*, 2012).

No caso da produção mensal, seria a relação entre a energia realmente produzida pelo sistema e a quantidade de energia que a matriz fotovoltaica geraria se ela funcionasse com potência nominal máxima por 24 horas por dia em um mês, e no caso da produção anual, a matriz fotovoltaica teria de funcionar 24 horas por dia nos 365 dias do ano (KASEM *et al*, 2014).

Segundo Galvão (2018), sistemas fotovoltaicos possuem fatores de capacidade relativamente baixos se comparados com outros sistemas de geração de energia elétrica. Isto por conta de o recurso solar ser intermitente devido ao movimento da Terra em relação ao sol e às variações climáticas. Almeida (2012) realizou um comparativo entre diversos sistemas de geração de eletricidade no Brasil, com relação ao Fator de Capacidade. São comparadas as usinas termelétricas, hidrelétricas, eólicas e os sistemas fotovoltaicos, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Fatores de Capacidade comuns para alguns sistemas de geração de eletricidade no Brasil.



Fonte: Almeida, 2012.

O comparativo mostra uma grande discrepância entre as termelétricas (com fatores de capacidades entre 80 e 100% na sua maioria) e os sistemas fotovoltaicos (com Fatores de Capacidade entre 10% e 20%). Segundo o autor, essa diferença ocorre devido à própria natureza do recurso solar. Por ser intermitente e sofrer variações significativas ao longo do dia, um sistema fotovoltaico opera em sua potência nominal durante poucas horas.

Segundo Zilles *et al* (2012), o Fator de Capacidade não representa efetivamente a qualidade da energia entregue por um sistema fotovoltaico, uma vez que essas fontes não podem ser consideradas como uma fonte de energia firme convencional. Para isso, alguns autores preferem adotar o conceito de Energia Específica para estudar a qualidade dos sistemas que utilizam fontes intermitentes de energia. No caso dos sistemas fotovoltaicos, é comum o uso do termo Produtividade Final do Sistema, representada por Y_f , do inglês *Final Yield*, para expressar a energia específica, que será mostrada a seguir.

2.5.2 Produtividade Final do Sistema (*Final Yield*)

A Produtividade Final do Sistema Y_f , dada em kWh/kWp, é definida como o fluxo de energia líquido diário, mensal ou anual de todo o sistema, dividida pela potência de pico do gerador fotovoltaico (KASEM *et al*, 2014) e pode ser encontrada através da Equação 2. Segundo Marion *et al* (2005), este índice normaliza a energia produzida em relação ao tamanho do sistema, conseqüentemente, é uma maneira conveniente de comparar a energia produzida por sistemas fotovoltaicos de tamanhos diferentes.

$$Y_f = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{P_{FV}^0} = \frac{E}{P_{FV}^0} \quad \text{Eq. 2}$$

Para Almeida (2012), esse índice possui grande dependência do tipo de montagem, da orientação e inclinação do gerador fotovoltaico e da disponibilidade natural do recurso solar, sendo, portanto, um parâmetro característico de uma determinada região geográfica. Assim, o conhecimento da produtividade final típica de uma determinada região permite avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico. Segundo o autor, valores baixos em relação à média podem indicar problemas ou falhas de projeto, assim como valores elevados podem indicar um sistema bem dimensionado e conectado a uma rede elétrica de qualidade. De acordo com Zilles *et al* (2012), trata-se de um bom procedimento, que permite determinar a qualidade dos

diferentes sistemas com equipamentos de diferentes fabricantes, tendo em vista que esse parâmetro pode relacionar a energia gerada em determinado período de tempo tanto com a potência nominal quanto com a área do arranjo fotovoltaico.

2.5.3 Desempenho Global (*Performance Ratio*)

De acordo com Dolara *et al* (2012) o Desempenho Global, representado por PR , do inglês *Performance Ratio*, é um índice adimensional que leva em consideração a quantidade líquida de energia diária, mensal ou anual produzida por um sistema fotovoltaico em condições reais de trabalho em relação à energia teórica de entrada do sistema. Assim, em termos simples, quanto maior a PR , maior a quantidade de energia solar que é convertida em energia elétrica. Segundo Marion *et al* (2005) é determinada pela divisão da Produtividade Final do Sistema pela Produtividade de Referência, como pode ser visto na Equação 3.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad \text{Eq. 3}$$

A Produtividade de Referência Y_r pode ser calculada através da relação entre a irradiação total no plano do arranjo $H_{t,\beta}$ (dada em kWh/m²), obtida através da integração da irradiância no plano G_β , em um determinado período, pela irradiância de referência G_{ref} nas condições padrão de teste que vale 1.000 W/m² (BHAJTA; MUKHERJEE, 2017), como pode ser visto na Equação 4.

$$Y_r = \frac{\int_{t_1}^{t_2} G_\beta(t) dt}{G_{ref}} = \frac{H_{t,\beta}}{G_{STC}} \quad \text{Eq. 4}$$

Para Marion *et al* (2005), a Produtividade de Referência define o recurso de radiação solar para o sistema fotovoltaico. É uma função da localização, orientação do módulo fotovoltaico e variabilidade meteorológica mês a mês e ano a ano. De acordo com Khalid *et al* (2016) este índice também é chamado de Número de Horas de Sol Pleno, pois, do ponto de vista matemático, representa a duração do tempo durante o qual a radiação solar monitorada está no nível de irradiação de referência.

O PR considera todas as perdas envolvidas em um SFCR, seja no gerador ou no sistema de condicionamento e no resto do sistema (MACÊDO, 2006). Assim, é útil para

determinar se um sistema fotovoltaico está funcionando conforme o esperado podendo identificar a existência de um problema, mas não a causa (ALMEIDA, 2012). Segundo Khalid *et al* (2016) este parâmetro ganhou ampla aceitação para avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos. Quanto mais próximo da unidade estiver seu valor, melhor será o desempenho de um sistema em comparação com outros sistemas em condições climáticas semelhantes. Ademais, um PR igual ou maior que 80% indica que o sistema possui um bom desempenho.

2.5.4 Energia produzida por um SFCR

A quantidade de energia produzida por um SFCR está intimamente relacionada ao desempenho dos geradores FV que os constituem. As perdas exclusivas do gerador fotovoltaico, também conhecidas como perdas por captura (do inglês *Capture Losses*), estão associadas a vários fatores, tais como: operação das células fora das condições padrão; quedas de tensão na fiação e diodos de proteção; sujeiras; sombreamentos parciais; dispersão de parâmetros; tensão de operação fora da tensão de máxima potência, espectro e orientação dos módulos FV (TELES, 2017).

Segundo Macêdo (2006), outros fatores adicionais estão associados às perdas na fiação e devido às diferenças entre as células individuais que constituem um módulo ou módulos individuais que constituem um gerador fotovoltaico. Além dessas perdas, existem também as perdas nos inversores que compõem o sistema. Segundo o autor, existem perdas independentes do carregamento do inversor, ou seja, independentes da potência de operação, que são as perdas de autoconsumo, e as perdas dependentes da potência de operação, relacionadas ao coeficiente de queda de tensão (presentes nos diodos e dispositivos de comutação), e ao coeficiente de perdas ôhmicas (presentes nos cabos, bobinas e resistências).

Dessa maneira, a geração mensal de um sistema fotovoltaico pode ser estimada com base no método da insolação, proposto por Villalva (2015). Segundo o autor, conhecendo-se o modelo de módulo que será utilizado, pode-se determinar a quantidade de energia produzida pelo sistema na localidade que será instalado, conforme está descrito na Equação 5.

$$E = H \times A \times \eta \times n \times d \times 0,75 \quad \text{Eq. 5}$$

Nesta equação, E é a energia produzida mensalmente pelo SFCR, dada em Wh, H é a irradiação diária no local de instalação do SFV, em Wh/m²/dia, A é a área da superfície do módulo, em m², η é a eficiência do módulo, n é o número de módulos instalados, d é a

quantidade de dias do mês e o valor de 0,75 está relacionado às perdas totais envolvidas nos sistemas fotovoltaicos, considerando um total de perdas de 25%.

Macêdo traz em sua pesquisa alguns valores específicos de perdas presentes nos sistemas FV. O autor realizou simulações numéricas com um SFCR de 11,07 kWp para diversas localidades do Brasil. Foi variado em cada simulação a configuração do SFCR e o Fator de Dimensionamento do inversor (FDI). Os sistemas simulados foram agrupados de acordo com a quantidade de módulos conectados ao inversor, nomeados de N1 a N8, sendo que nos grupos N1 a N6, os geradores são formados por 10 a 13 módulos em série, e nos grupos N7 e N8, são 16 módulos em série, que equivalem a uma faixa de operação que vai de 140 Volts a aproximadamente 280 Volts CC. Os valores encontrados na pesquisa para as perdas por captura para cada grupo citado, podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Perdas por captura encontradas para cada grupo.

Grupo	FDI	Perdas por Captura
N1	102,0	25,6
N2	99,8	20,0
N3	55,5	22,3
N4	57,0	20,0
N5	60,0	23,3
N6	68,0	20,1
N7	84,2	21,4
N8	83,0	22,9

Fonte: Macêdo, 2006.

Segundo o autor, além das perdas nos geradores FV, existe ainda perdas nos inversores. Estas perdas podem ser independentes (perdas por autoconsumo) ou dependentes do carregamento do inversor, ou seja, da sua potência de operação. As perdas dependentes são atribuídas basicamente a perdas no transformador saída, dispositivos de controle e regulação, medidores e indicadores, dispositivos de segurança que operam permanentemente, etc. Segundo Martin (1998) apud Macêdo (2006), as perdas devidas ao autoconsumo dos inversores que podem varia de 1 a 4%. Dessa maneira, pode ser considerado, um valor de aproximadamente 25% nos cálculos de geração de energia, relacionados ao somatório de todas as perdas envolvidas em um sistema fotovoltaico.

2.6 Análise de viabilidade econômica de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

De acordo com Torres (2006), qualquer projeto deve ter, em primeiro lugar, viabilidade técnica, isto é, pode ser realizado com os procedimentos de engenharia e dispositivos disponíveis. Porém, a viabilidade técnica é necessária, mas não é suficiente. É preciso que haja também viabilidade econômica. Neste caso o investimento é viável somente se remunerar adequadamente o capital investido, ou seja, se os benefícios forem maiores que os custos. Dessa maneira, para Newnan e Lavelle (2000), o processo de tomada de decisão exige que os resultados de alternativas viáveis sejam dispostos de modo que possam ser julgados quanto à eficiência econômica de cada uma.

Frezatti (2008) afirma que a viabilidade econômica de um projeto pode ser determinada através de uma perspectiva quantitativa (numérica) ou de uma perspectiva qualitativa (não-numérica). Na perspectiva qualitativa, a decisão de investir em um projeto decorre da manifestação de interesse de uma pessoa ou de um grupo sem, necessariamente, considerar os custos e benefícios da implantação. Assim, como afirmam Newnan e Lavelle (2000), a tomada de decisão ocorreria à revelia, ou seja, sem o reconhecimento da existência de uma oportunidade para tomá-la.

Já na análise quantitativa, de acordo com Frezatti (2008), deve-se projetar um Fluxo de Caixa que apresente as entradas e saídas e capital e sua periodicidade e, a partir de então, analisar e argumentar sobre a aderência estratégica do projeto ao indicar se o projeto foi desenvolvido para atender ou não às estratégias do plano da entidade, em especial os de longo prazo e, conseqüentemente, está alinhado a sua missão e visão além de fazer a análise econômico financeira com a apuração de métricas próprias das análises de Engenharia Econômica como, por exemplo, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o *Payback* (PB) e a Relação Custo Benefício (RCB).

2.6.1 Valor Presente Líquido

Segundo Nakabayashi (2015), o VPL dos investimentos, nada mais é do que a diferença entre os benefícios gerados pelo projeto e seus custos, onde os valores futuros são trazidos a um valor presente descontados a uma determinada taxa de juros. Dessa forma, segundo Silva *et al* (2016), a determinação do VPL pressupõe a existência da projeção de um Fluxo de Caixa e a determinação de uma taxa de desconto. É, portanto, o resultado da diferença entre as entradas e saídas de capital, corrigidos mês a mês. A expressão para o cálculo do VPL

é mostrada na Equação 6, em que F_{ct} é o fluxo de caixa no período t considerado, r é a taxa de desconto, n é o horizonte de vida útil do projeto I_0 é o investimento inicial.

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_{ct}}{(1+r)^t} \quad \text{Eq. 6}$$

Para a determinação da taxa de desconto, deve ser considerado o conceito da Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Segundo Sviech e Mantovan (2013), a TMA representa a taxa que os investidores esperam obter de um projeto e que seja equivalente à rentabilidade de outras aplicações realizadas e de pouco risco. Em outras palavras, é uma taxa de juros que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento. Portanto, de acordo com Torres (2006), se o VPL for positivo, o projeto será considerado economicamente viável, a uma TMA, pois, segundo Nakabayashi (2015), as receitas do projeto superam o valor investido somado às despesas do projeto.

Para exemplificar o cálculo do VPL, considere a seguinte situação hipotética, em que uma empresa está estudando a compra de uma máquina para fabricar uma determinada peça, com vida útil de 5 anos. A máquina custa R\$ 20.500,00 e será sucateada no fim dos 5 anos. O custo da produção é estimado em R\$ 0,10 por peça sendo gasto R\$ 0,50 de material em cada uma. A previsão de vendas é de 10.000 peças por ano, ao preço de R\$ 2,00, cada, supondo uma TMA de 15% ao ano. Este projeto trará como benefício a seguinte receita líquida anual: $10.000 \times (2 - 0,10 - 0,5) = R\$ 14.000,00$. Portanto, tendo em vista que o VPL (R\$ 26.430,17) é positivo ao final do período de vida útil, o projeto é economicamente viável. O Fluxo de caixa relativo dos 5 anos de vida da peça fabricada pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Fluxo de Caixa da situação hipotética.

PERÍODO (ANOS)	ENTRADAS DE CAPITAL	ENTRADAS DESCONTADAS	VPL
0	-R\$ 20.500,00	-R\$ 20.500,00	-R\$ 20.500,00
1	R\$ 14.000,00	R\$ 12.173,91	-R\$ 8.326,09
2	R\$ 14.000,00	R\$ 10.586,01	R\$ 2.259,92
3	R\$ 14.000,00	R\$ 9.205,23	R\$ 11.465,15
4	R\$ 14.000,00	R\$ 8.004,55	R\$ 19.469,70
5	R\$ 14.000,00	R\$ 6.960,47	R\$ 26.430,17

Fonte: Próprio autor.

2.6.2 Taxa Interna de Retorno

Para um fluxo de caixa qualquer, a TIR pode ser definida como a taxa que anula o VPL, ou seja, é a taxa que iguala o valor atual dos investimentos com o valor atual do restante do fluxo de caixa (TORRES, 2006). Assim, do ponto de vista matemático, a TIR é a taxa em que, quando empregada como a taxa de desconto no cálculo do VPL faz com que seu valor fique igual a zero. Portanto, é a raiz da função VPL, onde a variável independente é a taxa de desconto (NAKABAYASHI, 2015). A Equação 7 demonstra a relação entre a TIR e o VPL.

$$VPL = -I_0 + \frac{F_{c1}}{(1 + TIR)^1} + \frac{F_{c2}}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_{cn}}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad \text{Eq. 7}$$

De acordo Sviech e Mantovan (2013), a TIR pode ser calculada tanto por tentativa e erro, ou se recorrendo a uma calculadora financeira ou a um computador. O critério de análise, quando a TIR é usada para tomar decisões do tipo “aceitar-rejeitar”, é o seguinte: se a TIR for maior que a TMA, aceita-se o projeto; se for menor, rejeita-se o projeto. Dessa maneira, esse critério garante que a empresa esteja obtendo, pelo menos, sua taxa mínima de retorno.

Considerando o Fluxo de caixa da situação hipotética mostrada anteriormente, utilizando o *software* Excel, obtém-se como TIR o valor de 41,05%. Como esse valor é maior que a TMA utilizada no cálculo do VPL (15%), o projeto pode ser aceito.

2.6.3 Payback

O tempo de retorno de um investimento, ou *Payback* (PB), é o período o de tempo necessário para que o lucro ou outros benefícios de um investimento se igualem ao custo do investimento inicial. Dessa maneira, traz efetivamente uma medida útil, dizendo qual o tempo necessário para que o custo do investimento seja compensado pelos benefícios do investimento (NEWNAN; LAVELLE, 2000). O PB pode ser calculado através da Equação 8, em que R_e corresponde à receita fixa obtida em um determinado período fixo que pode ser semanal, mensal, anual ou outro intervalo de interesse.

$$PB = \frac{I_0}{R_e} \quad \text{Eq. 8}$$

Portanto, o PB é o número de períodos necessários para que o fluxo de caixa acumulado se torne positivo, isto considerando que este fluxo é do tipo em que o investimento é realizado no primeiro período e as receitas estão nos anos seguintes (NAKABAYASHI, 2015). Considerado novamente a situação hipotética apresentada no item 2.4.1, onde o investimento inicial foi de R\$ 20.500,00 e o benefício anual foi de R\$14.000,00. Considerando esses valores, o projeto terá como tempo de retorno do investimento, o período de 1,46 anos, ou seja, aproximadamente 1 ano e 6 meses.

2.6.4 Relação Custo-benefício

Essa técnica se baseia na razão dos benefícios para os custos, utilizando cálculos do VPL e do fluxo de caixa, sendo determinada através da Equação 9, mostrada a seguir. De acordo com Torres (2006) esse critério foi inicialmente desenvolvido para analisar a viabilidade de projetos públicos, onde o critério do lucro não faz muito sentido. De modo geral, benefício é tudo que é favorável aos objetivos do projeto, e custo, tudo que é desfavorável. Porém, sendo um quociente, tanto os benefícios quanto os custos devem ser expressos na mesma unidade, e a única que se mostrou viável foi o dinheiro.

$$RCB = \frac{I_0}{VPL} \quad \text{Eq. 9}$$

De acordo com Silva *et al* (2017a), a RCB também serve para selecionar um entre vários projetos, quando o capital é limitado. Nesse caso, deve ser escolhido o projeto que apresentem uma relação menor que um, pois quanto menor a RCB, melhor, ou seja, o projeto terá mais benefícios do que custos. Ademais, quando não houver a limitação de capital, deve-se investir em projetos que obtiverem um VPL positivo.

Para exemplificar o cálculo da RCB, o projeto hipotético descrito anteriormente, que teve como VPL ao fim da vida útil o valor de R\$ 26.430,17 considerando o investimento inicial de R\$ 20.500,00, o terá uma relação benefício de 0,78. Logo o projeto é viável economicamente, pois traz mais benefícios que custos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada na pesquisa, sendo discorrido sobre cada etapa executada para se atingir os objetivos propostos inicialmente. Na perspectiva da avaliação do desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos e das possibilidades de replicação em instituições de ensino *multicampi*, optou-se em trabalhar com a pesquisa de natureza quantitativa, mais condizente com os objetivos traçados inicialmente.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, primeiramente, foi realizado um levantamento bibliográfico constituído principalmente de livros, normas relacionadas ao tema e artigos científicos. Também foi feita uma caracterização do sistema fotovoltaico, objeto de estudo desta pesquisa. Para tal, foram analisados documentos técnicos como manuais e *datasheets* referentes aos principais componentes do sistema, disponíveis nos sites dos fabricantes, no caso dos módulos e dos inversores fotovoltaicos. O Memorial Descritivo do sistema fotovoltaico foi cedido pela Direção Geral do campus Floriano, para levantamento de informações como a área física do telhado ocupada pelos módulos, descrição do material utilizado, dentre outras informações pertinentes.

3.1 Caracterização do objeto de estudo

O objeto de estudo da pesquisa escolhido foi o sistema fotovoltaico instalado no *campus* Floriano do IFPI, em função de ser o primeiro sistema de minigeração do estado do Piauí instalado em uma instituição de ensino *multicampi* no estado. O sistema será denominado a partir de agora como Sistema IFPI-FLORIANO. Este sistema é classificado como sendo um SFCR e, de acordo com as RN nº 482/2012 e nº 687/2015, é enquadrado como sistema de Minigeração Distribuída. É composto por 660 módulos fotovoltaicos Policristalinos de modelo Canadian Solar CS6P-260P, com potência de 260 W cada, totalizando uma potência instalada de 171,6 kWp. As principais características do módulo utilizado encontram-se descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações técnicas do módulo fotovoltaico utilizado.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS STC	
Potência Máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	260 Wp
Tensão de Máxima Potência (V_{mpp})	30,4 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mpp})	8,56 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	37,5 V

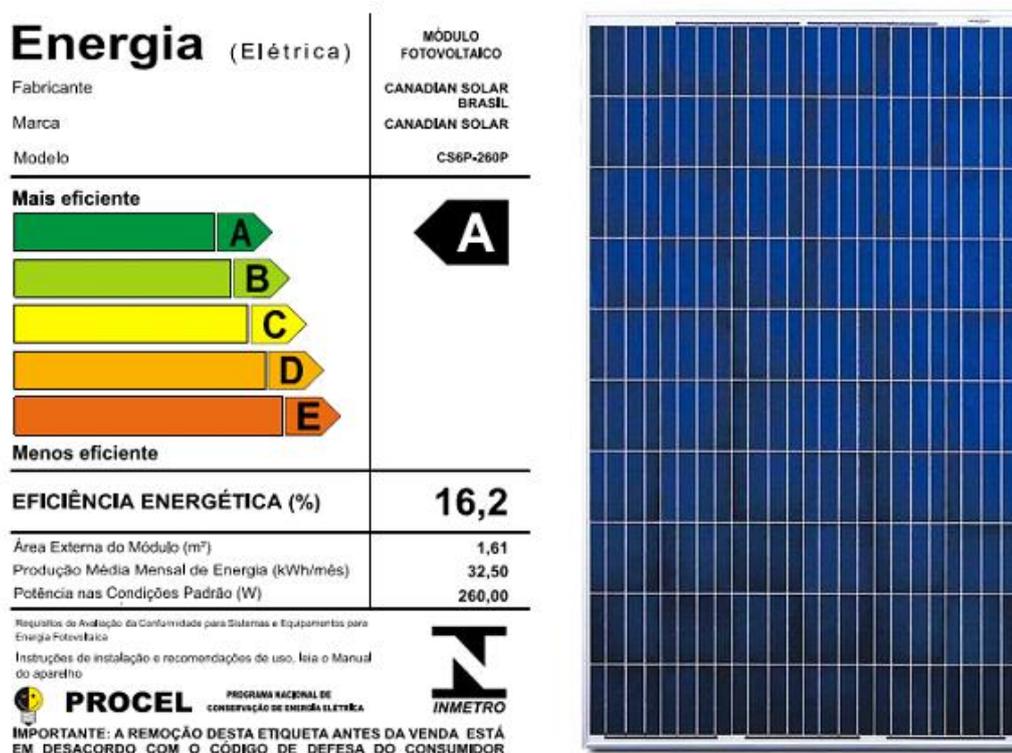
(Continuação)

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS STC	
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	9,12 A
Eficiência do Módulo	16,16 %
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	
Tipo de Célula	Policristalina, 6 polegadas
Arranjo das células	60 (6 × 10)
Dimensões (C x L x E)	1638 x 982 x 40 mm
Peso	18,5 kg
CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA	
Temperatura de Operação	-40° C ~ +85°C
Coeficiente de Temperatura $P_{máx}$	-0,41 % / °C
Coeficiente de Temperatura V_{oc}	-0,31 % / °C
Coeficiente de Temperatura I_{sc}	0,053 % / °C

Fonte: Canadian Solar Inc, 2016.

Vale a pena ressaltar que os módulos são certificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) como classe A em eficiência energética como mostra a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), descrita na Figura 16. Também é mostrada na figura uma imagem frontal do módulo utilizado.

Figura 16 – ENCE do módulo Canadian Solar CS6P-260P.



Fonte: LABSOL-UFRGS, 2015 e Canadian Solar Inc, 2016.

Com relação à topologia dos inversores instalados, o sistema fotovoltaico é caracterizado como sendo do tipo *MultiString*. Os inversores utilizados são da marca SMA Sunny Tripower, modelos STP 10000TL (um), STP 15000TL (um) e STP 25000TL (cinco), totalizando 7 inversores. As especificações técnicas dos inversores encontram-se descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas dos inversores SMA Sunny Tripower SIW500.

CARACTERÍSTICAS	STP 10000TL	STP 15000TL	STP 25000TL
Faixa de Tensão do MPPT	320-800 V	360-800 V	390-800 V
Tensão Nominal de Entrada	600 V	600 V	600 V
Número de MPPT/Strings por MPPT	2 / A:4, B:1	2 / A:5, B:1	2 / A:3, B:3
Máxima Corrente por MPPT	A:22 A, B:11 A/33A	A:33 A, B:11 A/33A	33 / 33 A
Potência Nominal de Saída	10.000 W	15.000 W	25.000 W
Tensão Nominal de Saída	380 V	380 V	380 V
Corrente Nominal de Saída	16 A	24 A	36,2 A
Eficiência Máxima	98,1 %	98,2 %	98,3 %

Fonte: SMA Solar Technology AG, 2012; 2016.

O sistema fotovoltaico é composto por cinco arranjos, apresentados na Figura 17, que estão divididos em dois subsistemas sendo um de 53,04 kWp (Subsistema 1), formado pelos arranjos dos telhados 1, 2 e 3, e outro de 118,56 kWp (Subsistema 2), composto pelos arranjos dos telhados 4N, 4S e 5. Os módulos fotovoltaicos encontram-se montados sobre estrutura metálica fixa com inclinação de 15°, orientada para o Nordeste (desvio azimutal de 5°) nos telhados 1, 2, 3 e 4N e orientada para o Sudoeste (desvio azimutal de -175°) nos telhados 4S e 5. Segundo Morais *et al* (2018), o *campus* tem com as coordenadas geográficas: Latitude 6°47'21,18" Sul e longitude 43°02'34,43" Oeste.

O arranjo localizado no Telhado 1, contém 34 módulos, e é constituído de duas *strings* de 17 módulos, conectadas no inversor de 10kW; no Telhado 2 tem-se um arranjo de 110 módulos, composto de três *strings* de 20 módulos e duas *strings* de 25 módulos conectadas no inversor de 25 kW; além desses, também está presente um arranjo de 60 módulos, no Telhado 3, com quatro *strings* de 15 módulos conectadas no inversor de 15 kW, perfazendo assim os 53,04 kWp do Subsistema 1.

Já o Subsistema 2 é composto dois arranjos de 228 módulos, localizados nos Telhados 4N, 4S e 5, distribuídos em 4 inversores de 25 kW, sendo 2 inversores por arranjo. Em cada inversor são conectadas três *strings* de 22 módulos e duas *strings* de 24 módulos. O que perfaz um total de 118,56 kWp. Para a conexão das *strings* aos inversores são utilizadas

string-box de uma entrada e uma saída, de duas entradas e uma saída e de três entradas e uma saída. No Anexa A, encontra-se descrito o diagrama unifilar presente no memorial descritivo.

Figura 17 – Disposição dos módulos fotovoltaicos sobre o telhado do campus e detalhe de cada arranjo.



Fonte: Adaptado de MORAIS *et al* (2018), Cidade Verde (2016), APEOP (2016).

3.2 Análise do desempenho operacional do Sistema

A análise do desempenho operacional do Sistema IFPI-FLORIANO foi feita através da apuração dos índices de mérito de sistemas fotovoltaicos: Fator de Capacidade, Produtividade Final e Desempenho Global. Para o cálculo dos dois primeiros parâmetros faz-se necessário, conforme descrito no item 2.5, o conhecimento dos valores de energia elétrica gerados mês a mês pelo sistema fotovoltaico, e para o cálculo do último parâmetro, é necessária a obtenção dos dados de irradiação solar que incidem no plano do sistema fotovoltaico. Os valores relativos à energia produzida pelo sistema foram obtidos através do *software* de monitoramento Sunny, próprio dos inversores instalados.

Porém, tendo em vista a não existência dos equipamentos de monitoramento do recurso solar no Sistema IFPI-FLORIANO descritos na IEC 61724, os dados de irradiação solar

foram coletados em bases de dados disponíveis para consulta pública. Foram consultados: o banco de dados do projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), os metadados fornecidos pela 2ª edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (ABES), que fornecem dados estimados da irradiação solar, além de dados provenientes de medições realizadas por estações meteorológicas controladas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). De posse desses dados, foi estimada a produção de energia do sistema através da Equação 5, que, por fim, foram comparadas com a geração real do sistema e com os resultados simulados pelos *softwares* Solergo e PVsyst, reconhecidos e utilizados internacionalmente no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

Segundo Martins *et al* (2005), o objetivo principal do Projeto SWERA é compilar e tornar disponível para acesso público informações confiáveis sobre o recurso solar e eólico em diversas partes do mundo. Dentro deste banco de dados, foi escolhida a base de resolução moderada do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e obtidos os dados para a Irradiação Global Horizontal para todos os meses do ano³, através da seleção do local desejado pelas suas coordenadas geográficas.

No ano de 2017 foi publicada a segunda edição ABES pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Trata-se de um trabalho cooperativo entre o órgão e pesquisadores de várias instituições no Brasil como, por exemplo, a Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). O ABES foi elaborado utilizando mais de 17 anos de dados provenientes de estações de medições e de imagens de satélites (PEREIRA *et al*, 2017). Os dados disponibilizados pelo ABES utilizados nesta pesquisa referem-se aos valores médios das estimativas do total diário de irradiação global horizontal, e foram coletados tendo em vista a localização geográfica do ponto de medição mais próximo do *campus* Floriano do IFPI.

O banco de dados do INMET abriga informações meteorológicas, em forma digital, coletadas através das várias estações meteorológicas da rede de estações do INMET, de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial. As estações meteorológicas automáticas (EMA) do INMET são empregadas para fins de estudos meteorológicos e monitoramento ambiental. Operam de forma automática e desatendida, com dados transmitidos via satélite e estão distribuídas por todo o território nacional. Trata-se da rede de coleta de dados de maior abrangência no território brasileiro, compreendendo cerca de

³ Os dados foram colhidos no dia 16 de setembro de 2017.

900 estações (PEREIRA *et al*, 2017). Uma EMA é composta de uma unidade central de memória (*datalogger*) conectada aos sensores de parâmetros meteorológicos que se deseja medir, como pressão atmosférica, temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, direção e velocidade do vento e radiação solar. Os dados são coletados de minuto em minuto, e integralizados a cada hora. Em seguida são disponibilizados gratuitamente, em tempo real, para serem transmitidos via satélite ou telefonia celular, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados. Dessa maneira ficam disponíveis para *download* no site da instituição, os dados dos últimos 365 dias (INMET, 2011).

Como o período de operação do sistema fotovoltaico iniciou-se em junho de 2016, os dados de irradiação tiveram que ser solicitados ao INMET via *e-mail*, pois já não se encontravam disponíveis para *download*. Os dados foram medidos através da estação meteorológica automática PI_A311, localizada na cidade de Floriano-PI e disponibilizados para cada hora do dia. Dessa forma, com base nos valores horários, foram calculados os totais para cada mês do ano, e, em seguida, calculadas as médias mensais. Na Figura 18 é possível ver um detalhe da estação do INMET, que possui como coordenadas geográficas: Latitude: 6°45'41,18"S e Longitude: 43°0'12,23" O e situa-se a uma distância de aproximadamente 1,46 km do *campus* Floriano do IPFI.

Figura 18 - Estação Automática PI_A311 do INMET, localizada em Floriano-PI.



Fonte: INMET, 2011.

O *software* PVsyst permite o projeto, simulação e análise de dados de um sistema fotovoltaico. Ele inclui dados meteorológicos dos bancos de dados internacionais mais usados, como NASA, SSE RETScreen e Meteonorm. Isso é essencial para o cálculo de uma instalação

em nosso local, porque em muitos casos o programa PVsyst não terá dados sobre o local onde o gerador fotovoltaico será instalado (MUÑOZ *et al*, 2017). O processo de simulação no PVsyst opera com valores horários. Para a irradiância, a geração sintética de valores horários das médias mensais é realizada por meio de modelos estocásticos desenvolvidos pela equipe de Collares-Pereira na década de 80. Esse modelo primeiro gera uma sequência de valores diários e, em seguida, uma sequência de 24 valores por hora por dia, usando as matrizes de transição de Markov (MERMOUD, WITTMER, 2014). Nesta pesquisa foi utilizada a versão gratuita do *software* para a estimar a produção de energia do sistema e foi selecionado do banco de dados Meteororm, por ser o banco disponível na versão utilizada e por já apresentar a localidade estudada como opção sem a necessidade de inserção manual das coordenadas geográficas.

A ferramenta computacional Solergo foi desenvolvida pela empresa italiana Electro Graphics, que permite avaliar sistemas FV conectados ou sistemas isolados à rede elétrica. Inúmeros recursos são disponibilizados pelo programa computacional com vistas a avaliar o desempenho operacional destes sistemas de produção de energia, com destaque para o cálculo da radiação solar local, a produção de energia em função dos parâmetros de operação, entre outros (MONTEIRO JUNIOR *et al*, 2016). O *software* disponibiliza dados de irradiação proveniente do ABES e do banco Electro Graphics que utiliza da dos de irradiação solar provenientes de medições por satélites. Nesta pesquisa foi selecionada a base de dados Electro Graphics para estimar a produção de energia do sistema.

Utilizando-se das estimativas de geração de energia, e dos dados reais de geração do sistema fotovoltaico, foram calculadas as métricas de Produtividade Final e Fator de Capacidade, conforme encontra-se descrito no item 2.5. Ademais, os valores de irradiação solar global horizontal das bases de dados citadas anteriormente, foram convertidos para valores de irradiação no plano dos módulos fotovoltaicos, necessários para o cálculo do Desempenho Global, utilizando-se o *software* Radiasol, versão 1. O programa encontra-se disponível para *download* e utilização gratuita na página do Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Segundo Tonin (2017), esse programa permite, a partir da inserção dos valores de irradiação no plano horizontal, identificar os valores de irradiação para qualquer plano, independentemente da inclinação e do desvio azimutal em relação ao norte. Assim, foi criada no *software* a estação fictícia denominada IFPI_FORIANO, na qual foram editados os valores de irradiação global horizontal para o período em análise (junho de 2016 a maio de 2017) e para a posição geográfica do IFPI onde o sistema encontra-se instalado.

No programa Radiasol, os cálculos são realizados através de rotinas que determinam o efeito da inclinação da superfície receptora e da anisotropia da radiação solar em suas componentes direta e difusa. Dessa maneira, o usuário pode selecionar o modelo de distribuição da radiação e obterá na tela, imediatamente, um conjunto de dados adicionais na forma de tabelas ou gráficos (LABSOL-UFRGS, 2018). Após o ajuste da inclinação dos módulos e do desvio azimutal do sistema fotovoltaico, obtém-se os valores da irradiação diária média no plano dos módulos para todos os meses do ano.

3.3 Avaliação econômica da instalação do Sistema

A avaliação financeira do sistema fotovoltaico foi desenvolvida com base na apuração de métricas próprias da Engenharia Econômica, quais sejam: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* (PB) e Relação Custo benefício (RCB). Foram considerados, na análise, o valor em Reais (R\$) da energia gerada pelo sistema, o investimento inicial. Segundo Silva *et al* (2016) a determinação dessas métricas pressupõe a existência da projeção de um Fluxo de Caixa, que é a diferença entre as entradas e as saídas de capital em cada período, e a consideração de uma Taxa de Desconto. Nesta pesquisa, este parâmetro foi determinado através da diferença entre os valores médios da variação anual da Taxa Selic e do reajuste das tarifas de energia, informadas pela Aneel, observadas nos últimos dez anos.

Segundo Carvalho (2014) na análise econômica de um sistema fotovoltaico, as entradas mais importantes são o custo inicial do sistema e a quantidade de energia que será fornecida ao longo da sua vida útil que nesta pesquisa foi considerado como sendo de 25 anos, tempo de garantia do módulo considerado contra perda de potência limitada a 80% da sua capacidade original, dado pelo fabricante.

Segundo Nakabayashi (2015), é comum considerar a degradação na geração dos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo, a qual geralmente é considerada, nos modelos de projeção, com valores de 0,5% a 1% ao ano, embora valores mais baixos sejam alcançados na prática. A garantia fornecida pelos fabricantes, em geral, é de uma degradação máxima de 1% ao ano. Assim, foi considerada uma taxa de degradação anual de 0,8% ao ano, na produção de energia (perda total de 20% em 25 anos).

De acordo com Landeira (2013), a maioria dos fabricantes considera como necessária a troca do inversor com 10 anos de operação contínua. Montenegro (2013), aplicou em sua pesquisa a taxa de 1% ao ano referente a custos com operação e manutenção com

sistemas fotovoltaicos. Dessa maneira, foi considerada o valor relativo a 10% sobre o investimento inicial a cada 10 anos, referente à troca dos inversores.

Assim, foi considerado o investimento inicial para a aquisição do SFV, através de processo licitatório, que segundo Moraes *et al* (2018) foi de R\$ 1.150.000,00, referentes à elaboração do projeto, fornecimento e instalação do sistema e treinamento, além do benefício gerado pelo projeto no valor de R\$ 0,331276/kWh a ser economizado nas faturas de energia, determinado pela média dos valores cobrados por cada kWh no horário fora-ponta para contratos com a tarifa verde, em vigor no *campus* Floriano do IFPI no período analisado, descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores Tarifários para consumidor do grupo A4 faturado com Tarifa Verde.

Mês/Ano	Tarifa Ponta	Tarifa Fora-Ponta
jun/16	R\$ 1,444364	R\$ 0,339723
jul/16	R\$ 1,436909	R\$ 0,337970
ago/16	R\$ 1,443740	R\$ 0,339576
set/16	R\$ 1,405076	R\$ 0,330482
out/16	R\$ 1,468635	R\$ 0,320924
nov/16	R\$ 1,468866	R\$ 0,337260
dez/16	R\$ 1,496253	R\$ 0,326960
jan/17	R\$ 1,482843	R\$ 0,324029
fev/17	R\$ 1,415193	R\$ 0,309246
mar/17	R\$ 1,474993	R\$ 0,344016
abr/17	R\$ 1,459152	R\$ 0,312250
mai/17	R\$ 1,490170	R\$ 0,352876
MÉDIA	R\$ 1,457183	R\$ 0,331276

Fonte: EDP-PI, 2017a.

A fim de se estimar a economia de energia, advinda da instalação do sistema fotovoltaico, foi analisado o consumo energético do referido *campus* e a produção de energia do sistema fotovoltaico no período de junho de 2016 a maio de 2017, relativas ao primeiro ano de operação do sistema, utilizando-se as faturas de energia do *campus*.

3.4 Avaliação das oportunidades de replicação do Sistema

Por fim, identificou-se as possibilidades de replicação do sistema fotovoltaico de Floriano, considerando a estrutura organizacional *multicampi* da instituição, através da análise das faturas de energia de todos os *campi* do IFPI, solicitadas ao Departamento de Engenharia Institucional do IFPI, localizado no campus Reitoria. Foi apurado o consumo de energia da

instituição no ano de 2017, considerando todos os seus *campi*. Em seguida estes foram classificados em relação ao consumo de energia percentual em relação ao consumo total da instituição.

Para a replicação do sistema, foi considerado o mesmo cenário do sistema fotovoltaico do *campus* Floriano com relação à potência instalada e o investimento inicial para a aquisição. Foi então estimada a energia a ser produzida mensalmente por cada sistema de acordo com os índices de irradiação solar de cada cidade, conforme a metodologia apresentada no item 3.1. Ademais foi feito um novo estudo de viabilidade econômica para cada um desses *campi*, conforme encontra-se descrito no item 3.2. Para isso, foram solicitados junto ao INMET os dados relativos às estações meteorológicas instaladas nas cidades em que o relativo *campus* do IFPI receberá o sistema fotovoltaico.

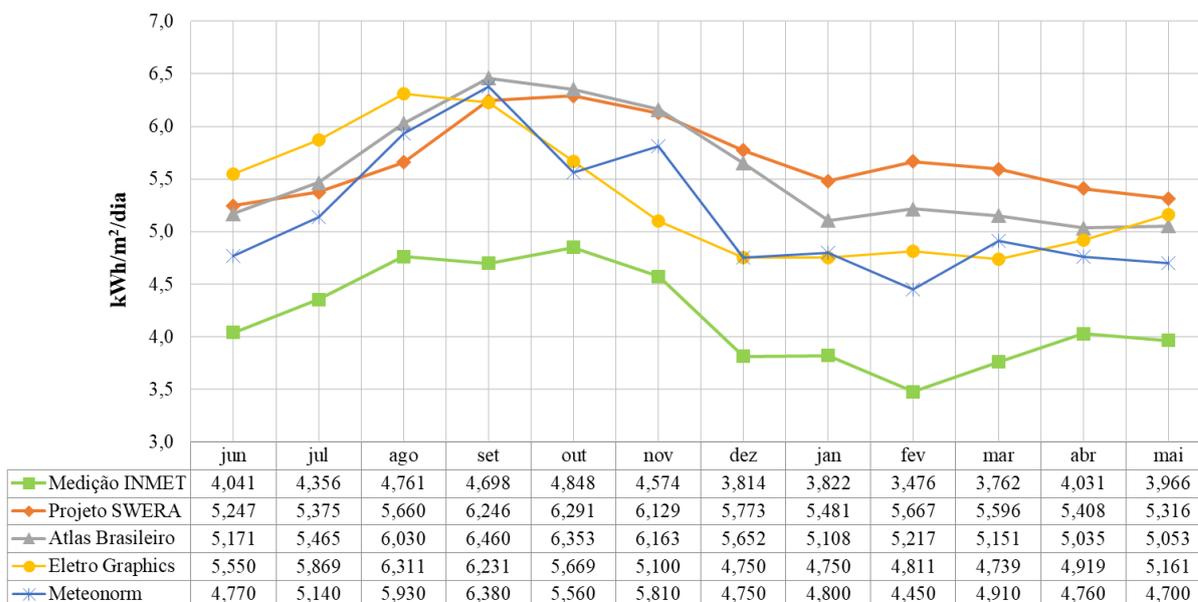
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresenta os resultados encontrados na pesquisa. Serão comparados os valores estimados de geração de energia elétrica provenientes de diferentes bancos de dados de radiação solar. Também serão apresentados os resultados referentes ao cálculo dos índices de mérito para o sistema IFPI-FLORIANO e o resultado da análise de viabilidade econômica do sistema fotovoltaico. Ao final do capítulo, serão mostradas as possibilidades de replicação deste sistema em outros *campi* da instituição e os benefícios trazidos para a mesma.

4.1 Análise do recurso solar da cidade de Floriano-PI

Para a realização da análise do desempenho operacional do Sistema IFPI-FLORIANO, conforme descrito no item 3.1, primeiramente foi realizada a análise do recurso solar da cidade de Floriano-PI. A seguir, na Figura 19, é apresentada a variação mensal da Irradiação Solar Global Horizontal ao longo do período analisado, referente ao banco de dados do projeto SWERA, ao ABES e aos dados medidos pela estação automática PI_A311 do INMET.

Figura 19 – Variação da Irradiação Global Horizontal para a Cidade de Floriano.



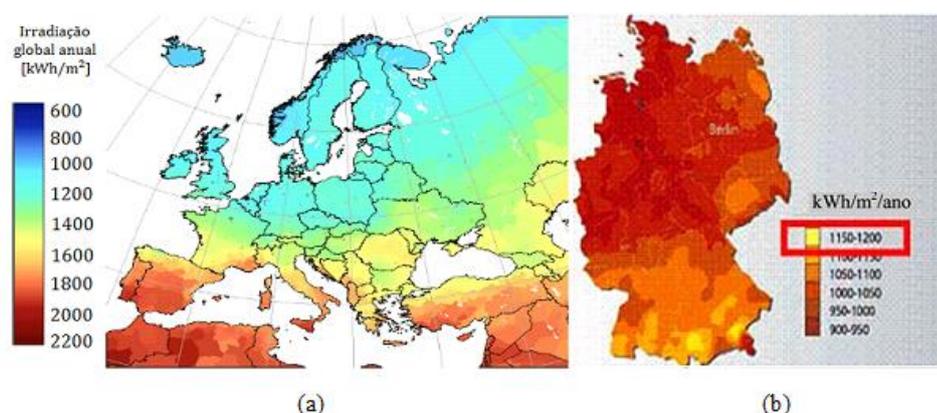
Fonte: Próprio autor.

Analisando o gráfico, destaca-se, no caso do projeto SWERA, o período que vai de setembro a dezembro pois apresenta valores médios de irradiação solar global acima da média

anual (5,682 kWh/m²/dia). No caso dos dados do ABES, os meses com irradiação solar acima da média anual de 5,572 kWh/m²/dia, são os meses que vão de agosto e dezembro. Em contrapartida, no caso dos dados medidos pelo INMET, percebe-se que o período onde os níveis médios de irradiação solar global superam a média anual (4,179 kWh/m²/dia) vai de julho a novembro. Já no caso dos dados do Meeonorm, proveniente do *software* PVsyst, os meses com irradiação solar cima da média anual de 5,163 kWh/m²/dia, são os meses que vão de agosto e novembro. Por fim, no caso do banco de dados Electro Graphics, proveniente do *software* Solergo, o período do ano com irradiação solar acima da média anual (5,322 kWh/m²/dia), são os meses que vão de junho a outubro. Ademais, nota-se que em todo o período analisado, os valores de irradiação solar global referentes ao projeto SWERA, ao ABES, e aos bancos de dados dos *softwares* são maiores que os dados medidos pela estação PI_A311 do INMET.

Segundo Nascimento (2015), a região Nordeste do Brasil apresenta os maiores valores de irradiação solar global do país. Esta região possui grande potencial relacionado à geração de energia solar, pelo fato de boa parte do seu território estar situada em uma faixa onde a incidência de raios ultravioletas atinge os maiores índices do mundo. Para Pinho e Galdino (2014), quando comparado com países europeus, onde a conversão fotovoltaica já é utilizada largamente, observa-se que em todo o território brasileiro há disponibilidade de irradiação solar equivalente ou melhor, chegando a superar países com capacidade instalada significativa de sistemas de geração fotovoltaica, como por exemplo a Alemanha, como pode ser visto na Figura 20a.

Figura 20 – Irradiação Solar Global incidente no plano horizontal na Europa (a) e na Alemanha (b).



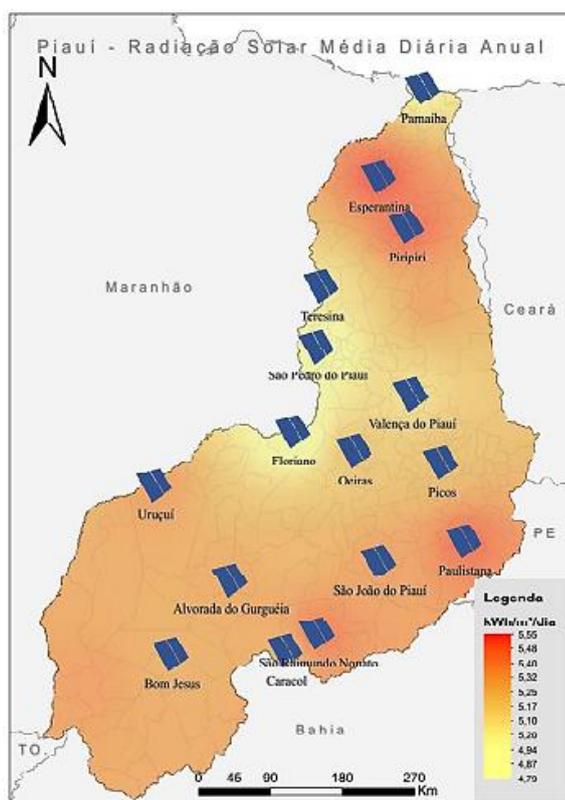
Fonte: MAYER (2008); SALAMONI, RUTHER, 2007.

Assim, analisando o recurso solar disponível verifica-se que a cidade de Florianópolis possui condições favoráveis para a geração de energia solar fotovoltaica. Comparando a maior faixa de valores de Irradiação Solar Global Horizontal da Alemanha, que vai de 1150 a

1200 kWh/m², vista na Figura 20b, com a média anual dos dados mensais estimados pelo projeto SWERA, pelo ABES, pelos *softwares* e também com os valores medidos pelo INMET, apresentados na Figura 19, fica claro o seu potencial para geração de energia solar fotovoltaica. As médias anuais correspondentes a todos os bancos de dados consultados nesta pesquisa estão acima dos maiores níveis de irradiação da Alemanha. Mesmo os meses em que Floriano apresenta os menores níveis de irradiação, são meses com Irradiação Solar Global Horizontal maiores que os maiores valores da Alemanha.

Lira e Moita Neto (2013) afirmam em um primeiro estudo sobre o cenário piauiense com relação às fontes renováveis de energia, que existem indicativos de condições favoráveis para o aproveitamento da energia solar no Estado do Piauí. Esses indicativos podem ser confirmados ao analisar os estudos posteriores realizados por Lira (2015), que em sua pesquisa elaborou um mapa caracterizando o recurso solar no estado, visto na Figura 21. Esse mapa de radiação solar média diária do estado do Piauí é a primeira experiência no sentido de uma abordagem macroespacial da quantificação dos índices de radiação solar no estado.

Figura 21 – Mapa de radiação solar média diária do estado do Piauí.



Fonte: Lira (2015).

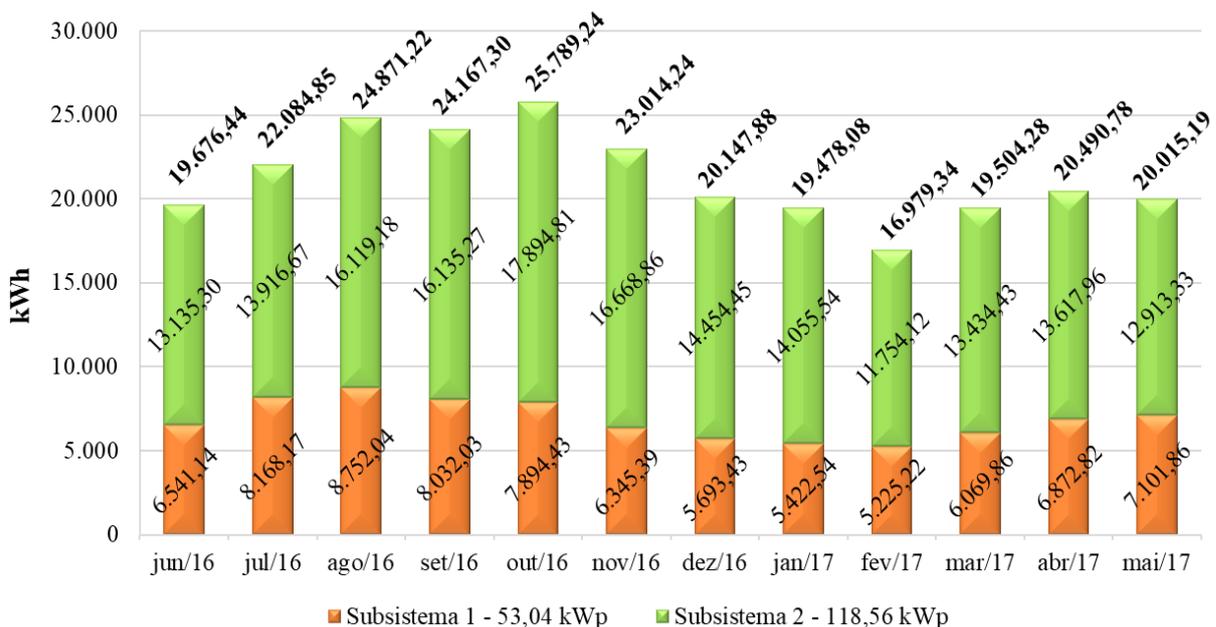
Percebe-se que a cidade de Floriano se situa na região que recebe os menores índices de radiação solar global. Assim de acordo com os resultados encontrados nesta pesquisa,

pode-se inferir o potencial para a utilização da energia solar no Estado do Piauí. No entanto, é preciso que se avalie o quão eficiente será esse aproveitamento, tendo como base a realização de estudos de viabilidade técnica e financeira. Neste sentido, serão mostrados a seguir os resultados referentes à quantidade de energia gerada pelo sistema comparada com estimativas realizadas que utilizaram os bancos de dados de irradiação solar apresentados neste item.

4.2 Análise da energia gerada pelo Sistema IFPI-FLORIANO

A Figura 22 mostra a geração mensal do sistema fotovoltaico instalado no *campus* Floriano do IFPI no seu primeiro ano de operação, composta pela produção do subsistema 1 (53,04 kWp) e pela produção do subsistema 2 (118,56 kWp). O sistema gerou nesse período um total de 256.218,84 kWh (82.118,93 kWh gerados pelo Subsistema 1, e 174.099,91 kWh pelo Subsistema 2. Assim, a produção média mensal de todo o sistema foi de 21.351,57 kWh (14.508,33 kWh referentes ao subsistema 1 e 6.843,24 kWh referentes ao subsistema 2). Vale a pena ressaltar que os valores foram obtidos através do *software* de monitoramento Sunny, próprio dos inversores instalados.

Figura 22 – Geração mensal dos subsistemas que compõem o sistema fotovoltaico IFPI-Floriano.

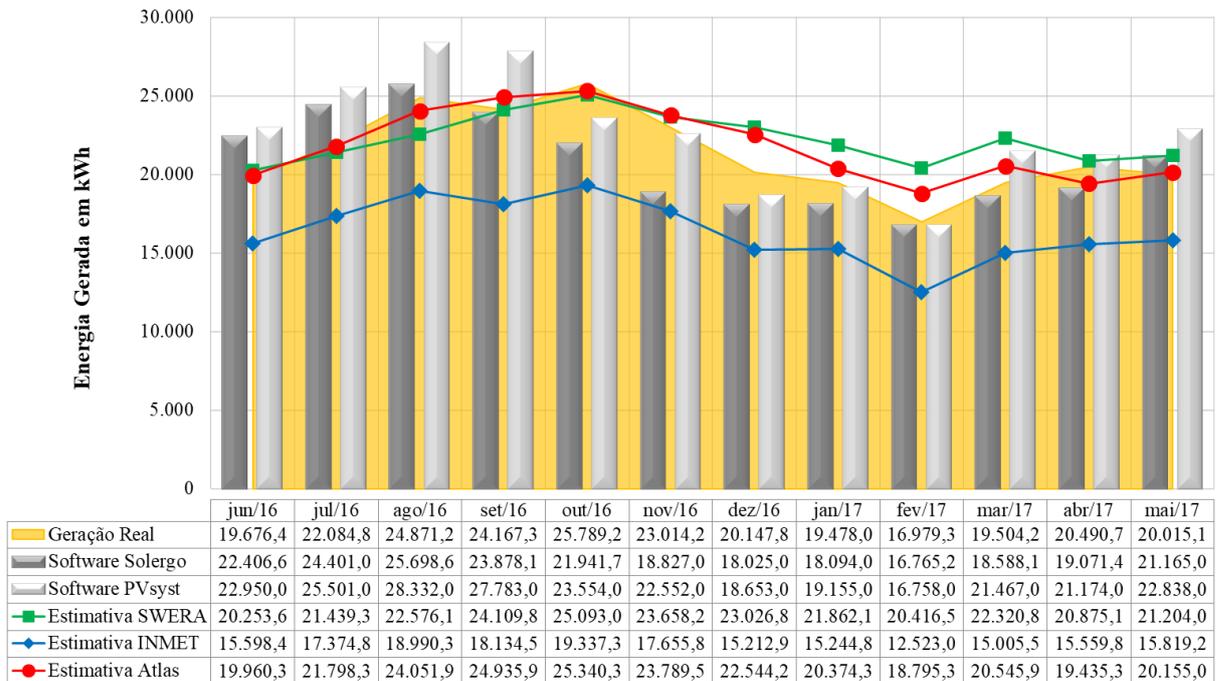


Fonte: Próprio autor.

Tendo em vista o potencial para a utilização da energia solar demonstrado pela cidade de Floriano-PI, e também pelo estado do Piauí, são apresentadas Na Figura 23 os valores

de geração estimados para o Sistema IFPI-FLORIANO encontrados através da Equação 5, descrita no item 2.5.4, utilizando os dados de irradiação obtidos com o banco de dados do projeto SWERA, do ABES e os dados de medição do INMET, e das simulações feitas através dos *softwares* Solergo e PVsyst, citados anteriormente.

Figura 23 – Estimativas de Geração de energia calculadas, através da Equação 5, e fornecidas pelos *softwares*.



Fonte: Próprio autor.

A estimativa de geração utilizando os dados de irradiação do banco de dados do Projeto SWERA fez um total anual de 266.836,16 kWh com uma média mensal de 22.236,35 kWh. Esses valores superam a geração real do sistema em 4,14%. Já a estimativa realizada utilizando os dados fornecidos pelo ABES trouxe um total anual de 261.726,73 kWh com uma média de 21.810,56 kWh que superam a geração real em 2,15%. Em contrapartida, a estimativa de geração utilizando os dados medidos pelo INMET acusou um total anual de 196.456,98 kWh com um média mensal de 16.371,41 kWh, ou seja, valores bem próximos da geração real com uma diferença de aproximadamente 23,32% abaixo.

No caso das estimativas apresentadas pelos *softwares*, a estimativa realizada utilizando o Solergo mostrou um total anual gerado de 248.862,22 kWh com uma média mensal de 20.738,52 kWh. Esta estimativa apresenta valores abaixo da geração real do sistema com uma diferença de 2,87% menor. Já a estimativa feita pelo PVsyst apresentou um total anual de 270.717,00 kWh, com uma média mensal de 22.559,75 kWh. Estes valores estão acima da geração real do sistema com uma diferença de 5,66%. Podewils (2010), realizou um estudo com

18 *softwares* fotovoltaicos comparando as previsões realizadas com três plantas fotovoltaicas reais, onde foram descobertas diferenças evidentes que chegavam a até 20%. O autor afirma que o *software* Solergo em comparação com os demais, apresentou simulações em tempo real com as melhores precisões. Em média, a previsão se desvia em 3% do rendimento real. O *software* PVSyst está entre os mais conhecidos no setor fotovoltaico, porém apresentou um desvio médio de 6,2%. Dessa maneira, os valores encontrados nas simulações realizadas nesta pesquisa para o caso do Sistema IFPI-FLORIANO, utilizando estes *softwares*, estão de acordo com os dados informados pelo autor, ao apresentar diferenças semelhantes às apresentadas nesta pesquisa.

Um resumo das estimativas realizadas pode ser visto na Tabela 7 juntamente com o seu percentual de produção em relação à geração real do sistema. Verifica-se analisando a tabela juntamente com os gráficos mostrados na Figura 23, que as estimativas fornecidas pelos *softwares* e a estimativa calculada utilizando os dados do ABES, bem como os dados colhidos na plataforma do Projeto SWERA, se aproximaram bem dos valores reais do sistema, quando comparadas com as estimativas calculadas utilizando os dados medidos pelo INMET relativos ao período de operação do Sistema IFPI-FLORIANO.

Tabela 7 - Resumo das estimativas de geração de energia em kWh e sua porcentagem em relação à geração real.

Base de Dados	Total Anual	Média	Porcentagem
ABES	258.075,38	21.506,28	2,15 % acima
SWERA	263.213,11	21.934,43	4,14 % acima
INMET	193.577,77	16.131,48	23,32 % abaixo
SOLERGO	248,862,22	20.738,52	2,87% abaixo
PVSYST	270.717,00	22.559,75	5,66% acima

Fonte: Próprio autor.

Os valores encontrados mostram que a energia gerada por sistemas fotovoltaicos pode ser estimada utilizando a Equação 5, descrita no item 2.5.4. por apresentarem grande proximidade com os valores reais da geração do sistema fotovoltaico. Porém, de acordo com o banco de dados que será consultado, pode haver uma diferença em relação à geração real do sistema. Vale a pena ressaltar que as bases de dados, com exceção dos dados do INMET, fornecem dados provenientes de séries históricas de longos períodos de tempo. Dessa maneira, já estão sendo considerados nos cálculos dos valores, tanto valores de anos típicos, que apresentam pouca variação, quanto de anos atípicos, que apresentam grandes variações por conta de fenômenos naturais, como, por exemplo El niño e La niña. A utilização de dados fornecidos por *softwares* de simulação são outras possíveis alternativas para se estimar a

geração de um sistema fotovoltaico, tendo em vista que se aproximam bem dos valores reais gerados pelos sistemas, mas estes ainda erram na estimativa de geração.

Portanto, os resultados demonstram que os dados do ABES são uma boa opção a ser utilizada, juntamente com a metodologia proposta, por pesquisadores e projetistas em análises técnico-econômicas de sistemas fotovoltaicos, por trazer valores próximos da realidade. O banco de dados SWERA também trouxe valores próximos da realidade, mas tendo em vista que o site foi desabilitado em 2017, não há mais a possibilidade de colher dados mensais de irradiação solar. Dessa maneira, são dados suficientes para que sejam calculados os índices de mérito desses sistemas, tendo em vista a não instalação de equipamentos para medição dos níveis de irradiação, seja um módulo de referência calibrado instalado no plano dos módulos ou um piranômetro instalados em conjunto com os sistemas, conforme descrito na norma IEC 61724.

Além disso, os resultados também mostram que a escolha da metodologia para o cálculo das estimativas de geração pode influenciar diretamente nos resultados das análises de viabilidade, podendo levar os gestores a não optarem na realização de um determinado projeto ou até mesmo a optarem por uma alternativa ruim, tendo em vista possíveis resultados que lhes são apresentados. Ademais, tendo em vista a dimensão da discrepância com os valores reais, gerada pela metodologia escolhida, alguns problemas podem surgir, como consequência associada, no decorrer da utilização do sistema. Problemas estes que poderão ser evidenciados a curto, médio e longo prazo.

No caso de estimativas extrapoladas, tanto o cabeamento quanto o dispositivo de proteção utilizado poderão ser sobre dimensionados. A curto prazo, poderão ocorrer quedas de tensão no sistema e, no caso de algum distúrbio na instalação à qual o sistema está conectado, os dispositivos de proteção poderão não atuar, o que resultaria na falha e/ou perda de equipamentos. A médio-longo prazo, as estimativas poderão comprometer a orçamentação do projeto e a sua viabilidade econômica, tendo em vista que o sistema irá demorar mais para se pagar do que o previsto. Já no caso de estimativas abaixo do real, o sistema poderá apresentar aquecimento nos condutores e outros equipamentos e disparos repentinos e desnecessários nos dispositivos de proteção.

4.3 Cálculo dos índices de mérito do Sistema IFPI-FLORIANO

De posse dos dados reais de geração e estimativas apresentados na Figura 23, e dos dados de irradiação solar global horizontal fornecidos pelos diferentes bancos de dados

descritos nesta pesquisa, apresentados na Figura 19, é possível calcular os índices de mérito, Produtividade Final, Fator de Capacidade e Desempenho Global, para o Sistema IFPI-FLORIANO, conforme encontra-se descrito no tópico 2.3.

4.3.1 Produtividade Final do Sistema (Y_f)

Na Tabela 8 podem ser vistos os valores mensais de Produtividade Final do sistema fotovoltaico IFPI-FLORIANO, calculados mês a mês conforme descrito na Equação 2, utilizando os dados reais de geração fornecidos pelo *software* de monitoramento dos inversores instalados. Também são mostrados na tabela os valores calculados por subsistema.

Tabela 8 – Valores de Produtividade Final, em kWh/kWp, para o Sistema IFPI-FLORIANO.

Mês/Ano	Subsistema 1	Subsistema 2	Total do Sistema
jun/16	123,32	110,79	114,66
jul/16	154,00	117,38	128,70
ago/16	165,01	135,96	144,94
set/16	151,43	136,09	140,84
out/16	148,84	150,93	150,29
nov/16	119,63	140,59	134,12
dez/16	107,34	121,92	117,41
jan/17	102,23	118,55	113,51
fev/17	98,51	99,14	98,95
mar/17	114,44	113,31	113,66
abr/17	129,58	114,86	119,41
mai/17	133,90	108,92	116,64
Total Anual	1.548,25	1.468,45	1.493,12

Fonte: Próprio autor.

O Subsistema 1 teve uma produtividade final no primeiro ano de operação do sistema IFPI-Floriano de 1.548,25 kWh/kWp. A produtividade final do Subsistema 2 foi de 1.468,45 kWh/kWp. Já a Produtividade Final do sistema foi de 1.493,12 kWh/kWp. Segundo Teles (2017), através desse índice de desempenho é possível realizar a comparação de sistemas que possuem geradores de diferentes tamanhos, uma vez que normaliza a energia injetada na rede em relação à potência nominal do gerador FV. Quaglia (2010) traz em seu trabalho valores médios típicos de produtividade final, em kWh/kWp, para as diferentes regiões do Brasil estimados com base em valores encontrados na literatura científica. Os valores estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios de Produtividade Final, em kWh/kWp, estimados para cada região do Brasil

Região	Produtividade Final
Nordeste	1580
Norte	1500
Centro-Oeste	1460
Sudeste	1300
Sul	1250

Fonte: Quaglia, 2010.

De acordo com os valores descritos, os sistemas fotovoltaicos instalados na região Nordeste do Brasil são os que possuem maior produtividade, em torno dos 1.580 kWh/kWp. Assim, verifica-se que o valor de produtividade final encontrado para sistema IFPI-FLORIANO (1.493,12 kWh/kWp) não está distante desta realidade. Acredita-se que esta diferença possa ter ocorrido por conta dos seus desvios azimutais com relação ao Norte, e também por conta dos próprios equipamentos instalados, com relação às suas eficiências. Na Tabela 10 são vistos os valores de Produtividade Final calculados para cada estimativa realizada, e também com os valores fornecidos pelos *softwares* utilizados na pesquisa.

Tabela 10 – Valores de Produtividade Final, em kWh/kWp, para cada estimativa apresentada.

Mês/Ano	Estimativa SWERA	Estimativa INMET	Estimativa ABES	Software Solergo	Software PVsyst
jun/16	118,03	90,90	116,32	130,57	133,74
jul/16	124,94	101,25	127,03	142,20	148,61
ago/16	131,56	110,67	140,16	149,76	165,10
set/16	140,50	105,68	145,31	139,15	161,91
out/16	146,23	112,69	147,67	127,87	137,26
nov/16	137,87	102,89	138,63	109,71	131,42
dez/16	134,19	88,65	131,38	105,04	108,70
jan/17	127,40	88,84	118,73	105,44	111,63
fev/17	118,98	72,98	109,53	97,70	97,66
mar/17	130,08	87,45	119,73	108,32	125,10
abr/17	121,65	90,68	113,26	111,14	123,39
mai/17	123,57	92,19	117,45	123,34	133,09
Total Anual	1.554,99	1.144,85	1.525,21	1.450,25	1.577,60

Fonte: Próprio autor.

A estimativa calculada através da Equação 5, acusou um valor de Produtividade Final de 1.554,99 kWh/kWp utilizando os dados do Projeto SWERA, 1.144,85 kWh/kWp com os dados do INMET, 1.525,21 kWh/kWp utilizando-se dos dados do ABES. Já os *softwares* Solergo e PVsyst informaram os valores de 1.450,25 e 1.577,60 kWh/kWp para a Produtividade Final do sistema. Percebe-se que estes valores, exceto o que utilizou os dados do INMET e o

informado pelo *Software Solergo*, estão de acordo com o que informa a Tabela 10, com relação à Produtividade Final de sistemas instalados na Região Nordeste.

4.3.2 Fator de Capacidade (*FC*)

Na Tabela 11 são vistos os valores de Fator de Capacidade calculados mensalmente a partir dos valores de Produtividade Final verificados ao longo de 24 horas das respectivas quantidades de dias de cada mês, e o valor anual, calculado ao longo dos 365 dias de operação do sistema IFPI-FLORIANO, utilizando-se dos dados reais de geração.

Tabela 11 – Fator de Capacidade, em porcentagem (%), do sistema fotovoltaico IFPI-FLORIANO.

Mês	Subsistema 1	Subsistema 2	Total do Sistema
jun/16	17,13	15,39	15,93
jul/16	20,70	15,78	17,30
ago/16	22,18	18,27	19,48
set/16	21,03	18,90	19,56
out/16	20,01	20,29	20,20
nov/16	16,62	19,53	18,63
dez/16	14,43	16,39	15,78
jan/17	13,74	15,93	15,26
fev/17	14,66	14,75	14,72
mar/17	15,38	15,23	15,28
abr/17	18,00	15,95	16,58
mai/17	18,00	14,64	15,68
Total Anual	17,67	16,76	17,04

Fonte: Próprio autor.

Quaglia (2010) também traz em seu trabalho valores médios típicos de Fator de Capacidade para as diferentes regiões do Brasil estimados com base em valores encontrados na literatura científica. Os valores estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores médios de Fator de Capacidade, em porcentagem (%), estimados para cada região do Brasil

Região	Fator de Capacidade
Nordeste	18,1
Norte	17,1
Centro-Oeste	16,6
Sudeste	14,8
Sul	14,2

Fonte: Quaglia, 2010.

De acordo com os dados apresentados, os sistemas fotovoltaicos instalados na região Nordeste do Brasil são os que possuem maior Fator de Capacidade, em torno dos 18,1%. Assim, verifica-se que o valor de Fator de Capacidade encontrado para sistema IFPI-FLORIANO (17,04 %) não está distante desta realidade, evidenciando-se assim, que o sistema está aproveitando bem a energia solar incidente nos módulos fotovoltaicos. Na Tabela 13 são vistos os valores de Fator de Capacidade calculados a partir de cada estimativa realizada.

Tabela 13 – Valores de Fator de Capacidade, em porcentagem (%), para cada estimativa apresentada.

Mês	Estimativa Swera	Estimativa INMET	Estimativa ABES	Software Solergo	Software PVsyst
jun/16	16,39	12,63	16,16	18,14	18,58
jul/16	16,79	13,61	17,07	19,11	19,97
ago/16	17,68	14,87	18,84	20,13	22,19
set/16	19,51	14,68	20,18	19,33	22,49
out/16	19,65	15,15	19,85	17,19	18,45
nov/16	19,15	14,29	19,25	15,24	18,25
dez/16	18,04	11,92	17,66	14,12	14,61
jan/17	17,12	11,94	15,96	14,17	15,00
fev/17	17,71	10,86	16,30	14,54	14,53
mar/17	17,48	11,75	16,09	14,56	16,81
abr/17	16,90	12,59	15,73	15,44	17,14
mai/17	16,61	12,39	15,79	16,58	17,89
Total Anual	17,75	13,07	17,41	16,56	18,01

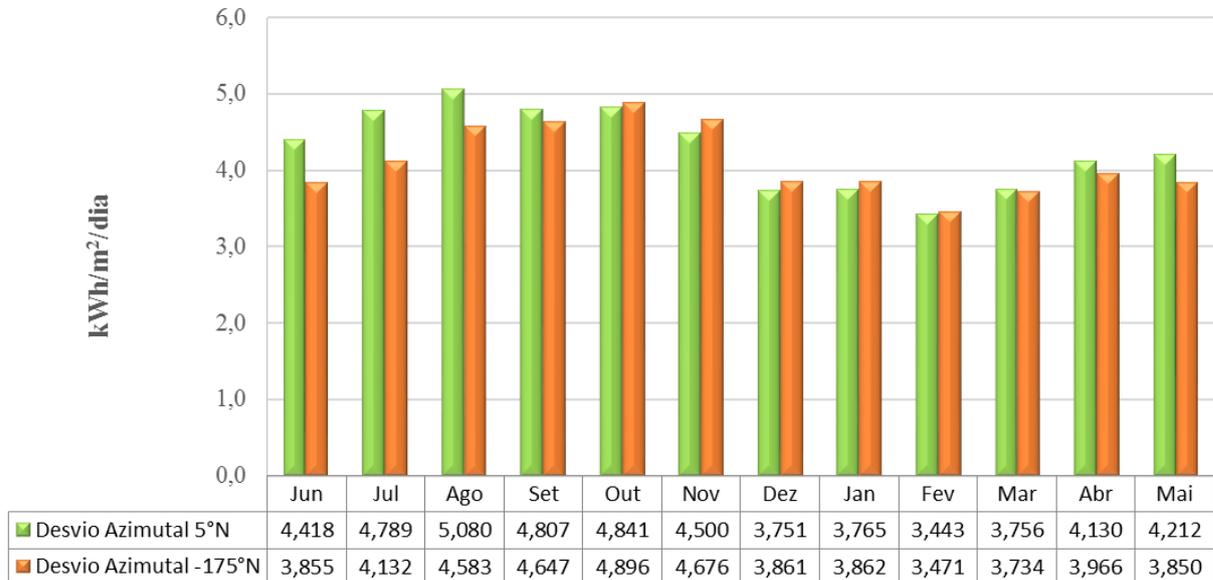
Fonte: Próprio autor.

A estimativa calculada através da Equação 5, acusou um Fator e Capacidade de 17,75 % utilizando os dados do Projeto SWERA, 13,07 % com os dados do INMET, 17,41 % utilizando-se dos dados do ABES. Já os *softwares* Solergo e PVsyst informaram os valores de 16,56 e 18,01 % para o Fator de Capacidade do sistema. Percebe-se que estes valores, exceto o que utilizou os dados do INMET, e o do *Software* Solergo, estão de acordo com o que informa a Tabela 10, com relação ao Fator de Capacidade de sistemas instalados na Região Nordeste.

4.3.3 Desempenho Global (PR)

Para o cálculo do Desempenho Global (PR) do sistema, segundo as Equações 3 e 4, é necessário calcular o valor da Irradiação no plano dos Módulos fotovoltaicos. Para isso foi utilizando o *software* Radiasol, versão 1, no qual as médias mensais dos valores de irradiação medidos pelo INMET foram inseridos manualmente, e os valores encontrados estão descritos na Figura 24.

Figura 24 – Irradiação solar no plano dos módulos calculada a partir do banco de dados do INMET.



Fonte: Próprio autor.

De posse desses dados e dos valores de Produtividade Final mostrados na Tabela 8, foram calculados os valores de Desempenho Global mês a mês para o sistema fotovoltaico, sendo que os valores mensais de irradiação solar no plano dos módulos para cada desvio azimutal (5° para o Subsistema 1 e -175° para o Subsistema 2) foram multiplicados pela quantidade de dias do relativo mês analisado. Os valores encontrados encontram-se descritos na Tabela 14.

Tabela 14 – Desempenho Global do sistema fotovoltaico IFPI-FLORIANO calculado com dados do INMET.

Mês	Subsistema 1	Subsistema 2	Total do Sistema
jun/16	93,05 %	95,80 %	94,95 %
jul/16	103,73 %	91,64 %	95,38 %
ago/16	104,78 % *	95,70 %	98,50 %
set/16	105,01 % *	97,62 %	99,90 %
out/16	99,18 %	99,45 %	99,36 %
nov/16	88,62 %	100,22 % *	96,64 %
dez/16	92,31 %	101,86 % *	98,91 %
jan/17	87,59 %	99,02 %	95,49 %
fev/17	102,19 % *	102,01 % *	102,06 % *
mar/17	98,29 %	97,89 %	98,01 %
abr/17	104,58 % *	96,54 %	99,02 %
mai/17	102,55 % *	91,26 %	94,75 %
Total Anual	98,49 %	97,42 %	97,75 %

Fonte: Próprio autor.

Destaque deve ser dado aos meses marcados na Tabela 14 com um (*), nos quais a *PR* foi superior a 100%. Tonin (2017) encontrou resultados semelhantes em sua pesquisa ao analisar a operação de um sistema fotovoltaico de 3 kWp instalado na cidade de Curitiba no período de fevereiro a dezembro de 2016, como pode ser visto na Tabela 15. Segundo a autora, a possível causa de em alguns meses a *PR* ultrapassar os 100%, seria o fato de que possivelmente, haviam nuvens próximas a região onde está instalado o piranômetro do INMET, reduzindo assim, a irradiância medida. Ao passo, que tais nuvens não estavam interferindo no sistema fotovoltaico.

Tabela 15 - Valores de Desempenho Global de um SFCR de 3 kWp instalado em Curitiba.

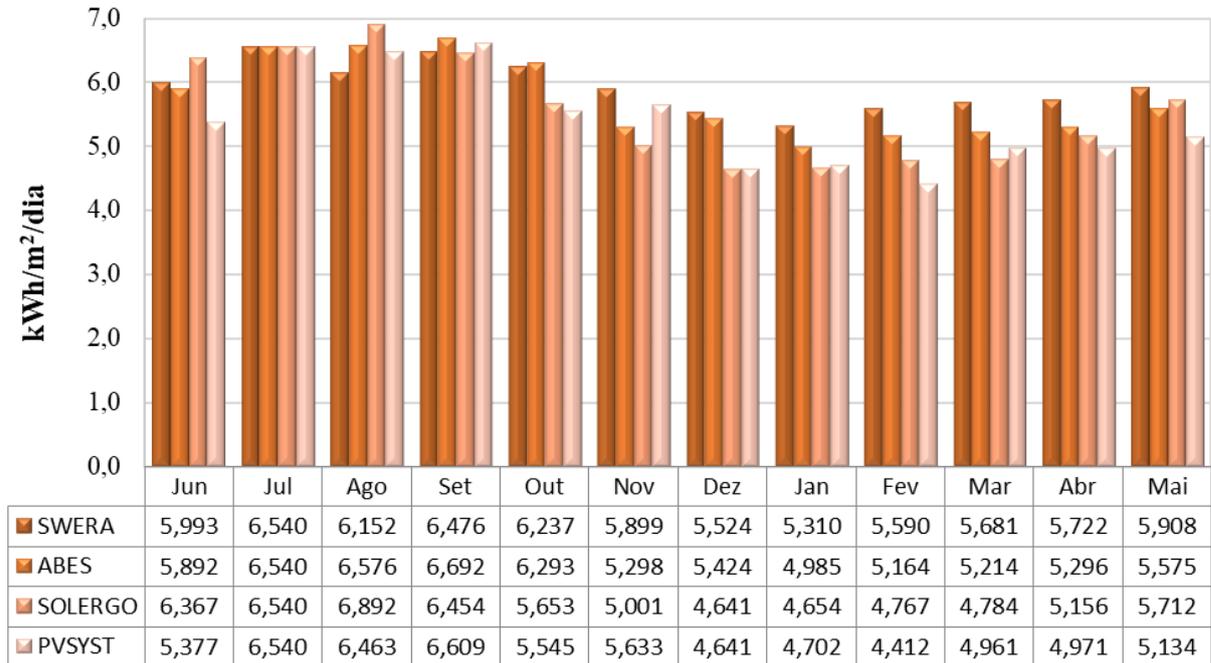
Mês	Desempenho Global
Fevereiro	83,90 %
Março	84,75 %
Abril	86,39 %
Maiο	91,30 %
Junho	106,27 %
Julho	96,22 %
Agosto	92,78 %
Setembro	83,96 %
Outubro	81,69 %
Novembro	79,11 %
Dezembro	78,32 %
Total Anual	87,70 %

Fonte: Tonin, 2017.

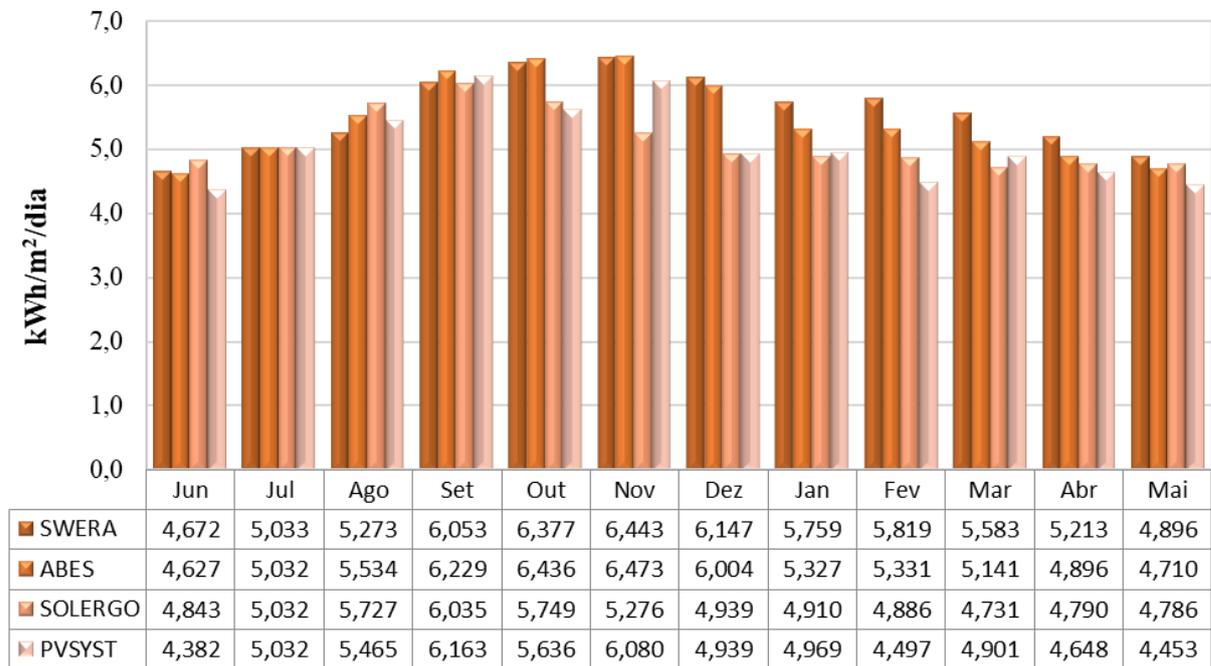
Segundo Reich (2012) as eficiências dos componentes dos sistemas fotovoltaicos aumentaram continuamente nas últimas décadas, trazendo como uma melhora considerável no desempenho dos sistemas. Os intervalos típicos da *PR* subiram de 50% para 75% no final da década de 1980 e 70– 80% nos anos 90 para valores maiores que 80% atualmente. Por outro lado, de acordo com Marion *et al* (2005), devido às perdas por temperatura dos módulos fotovoltaicos, os valores de *PR* são maiores no inverno que no verão e normalmente ficam na faixa entre 60% e 80%. Porém, percebe-se que a *PR* do Sistema IFPI-FLORIANO, apresenta-se bem acima disso (aproximadamente 97,75%). Verifica-se, portanto, a não confiabilidade da utilização de dados medidos por estações meteorológicas no cálculo da *PR*.

Dessa maneira, foram também convertidos os dados de irradiação dos demais bancos de dados analisados nesta pesquisa e os valores encontram-se descritos no gráfico da Figura 25, considerando cada desvio azimutal dos subsistemas (5° N e -175°N), para serem utilizados no cálculo da *PR* do sistema IFPI-FLORIANO.

Figura 25 – Irradiação solar no plano dos módulos para os demais bancos de dados.
Desvio azimutal de 5° N (a) e -175° N (b).



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 16 são apresentados os valores de Desempenho Global calculados utilizando os dados de irradiação descritos nas Figuras 25a e 25b e os valores reais de geração apresentados na Figura 22.

Tabela 16 – Desempenho Global do Sistema IFPI-FLORIANO calculado a partir dos demais bancos de dados.

ABES				SWERA		
Mês	Subsistema 1	Subsistema 2	Total	Subsistema 1	Subsistema 2	Total
jun/16	69,77%	79,81%	76,71%	68,59%	79,05%	75,82%
jul/16	75,96%	75,25%	75,47%	75,96%	75,23%	75,46%
ago/16	80,94%	79,25%	79,77%	86,52%	83,17%	84,21%
set/16	75,43%	72,83%	73,63%	77,95%	74,95%	75,87%
out/16	76,30%	75,65%	75,85%	76,98%	76,35%	76,55%
nov/16	75,27%	72,40%	73,29%	67,60%	72,74%	71,15%
dez/16	63,84%	65,50%	64,99%	62,68%	63,98%	63,58%
jan/17	66,16%	71,79%	70,05%	62,11%	66,40%	65,08%
fev/17	68,13%	66,42%	66,95%	62,94%	60,85%	61,49%
mar/17	70,80%	71,10%	71,01%	64,98%	65,47%	65,32%
abr/17	81,56%	78,20%	79,24%	75,49%	73,45%	74,08%
mai/17	77,48%	74,60%	75,49%	73,11%	71,76%	72,18%
Total Anual	73,47%	73,57%	73,54%	71,24%	71,95%	71,73%
SOLERGO				PVSYST		
Mês	Subsistema 1	Subsistema 2	Total	Subsistema 1	Subsistema 2	Total
jun/16	64,56%	76,25%	72,64%	76,45%	84,28%	81,86%
jul/16	75,96%	75,25%	75,47%	75,96%	75,25%	75,47%
ago/16	77,23%	76,58%	76,78%	82,36%	80,25%	80,90%
set/16	78,21%	75,17%	76,11%	76,38%	73,61%	74,46%
out/16	84,93%	84,69%	84,77%	86,59%	86,39%	86,45%
nov/16	79,74%	88,83%	86,02%	70,79%	77,08%	75,14%
dez/16	74,61%	79,63%	78,08%	74,61%	79,63%	78,08%
jan/17	70,86%	77,89%	75,72%	70,14%	76,96%	74,85%
fev/17	73,81%	72,47%	72,88%	79,75%	78,74%	79,05%
mar/17	77,17%	77,26%	77,23%	74,41%	74,58%	74,53%
abr/17	83,77%	79,93%	81,12%	86,89%	82,37%	83,77%
mai/17	75,62%	73,41%	74,09%	84,13%	78,90%	80,52%
Total Anual	76,37%	78,11%	77,58%	78,20%	79,00%	78,76%

Fonte: Próprio autor.

Os valores de Desempenho Global encontrados utilizando bando de dados do Atlas Brasileiro de Energia perfizeram um total anual de 73,54%. Já o Desempenho Global calculado com dados de irradiação solar provenientes do Projeto SWERA, acusaram um total anual de 71,73%. O mesmo cálculo utilizando os dados dos *softwares* Solergo e Pvsyst mostraram um valor de 77,58 % e 78,76 %, respectivamente. Percebe-se, portanto que todos esses valores estão de acordo com os valores médios apresentados por Mario *et al* (2005) e Reich (2012).

Também foram calculados os valores mensais para o Desempenho Global a partir das estimativas de geração apresentadas anteriormente na Figura 23, e também a partir dos dados informados pelos *softwares*. Os valores encontrados encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Desempenho Global calculado a partir das estimativas de geração de energia.

Mês	Estimativa Swera	Estimativa INMET	Estimativa ABES	Software Solergo	Software PVsyst
jun/16	73,78%	73,25%	73,72%	77,65%	91,36%
jul/16	69,65%	73,22%	70,82%	79,28%	82,85%
ago/16	74,29%	73,89%	74,67%	76,57%	89,30%
set/16	74,76%	74,52%	74,98%	74,28%	84,51%
out/16	74,79%	74,67%	74,85%	72,35%	79,20%
nov/16	74,47%	74,75%	78,52%	71,17%	74,80%
dez/16	74,18%	75,14%	74,17%	70,74%	73,20%
jan/17	74,26%	75,15%	74,28%	71,13%	74,47%
fev/17	74,49%	75,39%	74,55%	72,29%	78,30%
mar/17	74,50%	75,32%	74,60%	73,45%	81,84%
abr/17	74,17%	74,67%	74,08%	74,49%	85,52%
mai/17	73,79%	73,77%	73,68%	75,80%	89,56%
Total Anual	73,93%	74,48%	74,41%	74,10%	82,08%

Fonte: Próprio autor.

Já os valores de PR calculados utilizando-se das estimativas de geração, acusaram um total anual de 73,93 % quando da utilização dos dados de irradiação do Projeto SWERA, 74,48 % utilizando os dados de irradiação medidos pela estação automática PI_A311 do INMET e 74,41 % utilizando os dados do ABES. Os valores calculados utilizando as estimativas apresentadas pelos *softwares* Solergo e PVsyst, acusaram os valores de 74,10 % e 82,02 %, respectivamente. Percebe-se, portanto que todos esses valores também estão de acordo com os valores médios apresentados por Mario *et al* (2005) e Reich (2012).

Assim, pode-se concluir que o fato de um sistema fotovoltaico não apresentar um sistema de monitoramento do recurso solar, instalado junto ao próprio sistema fotovoltaico, um pirânometro ou um módulo de referência, pode afetar o cálculo deste parâmetro. Portanto, evidencia-se uma limitação no método de cálculo da PR, quando da não utilização de dados de irradiação provenientes de medições feitas no mesmo plano do arranjo fotovoltaico, conforme orienta a IEC 61724.

Segundo Teles (2017), caso não haja a possibilidade de medição da irradiância no plano do gerador FV, devido à ausência de um equipamento de medição (por exemplo, piranômetro) ou armazenamento (*Datalogger*), ou caso os dados obtidos do sensor estejam incorretos, a Produtividade Final pode ser o mais adequado indicador a ser utilizado para avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico. Porém, os resultados desta pesquisa mostram que, além da Produtividade Final, o Fator de Capacidade também pode ser um índice de mérito a ser sempre considerado em análises de desempenho de sistemas fotovoltaicos, apesar de não estar

descrito na IEC 61724. Dessa maneira, os valores apresentados por estes dois parâmetros mostram que o sistema fotovoltaico IFPI-FLORIANO pode ter apresentado um bom funcionamento em todo o seu primeiro ano de operação.

Vale a pena ressaltar que, no caso das instituições de ensino *multicampi*, os índices de mérito encontrados para um sistema fotovoltaico existente, podem ser um indicativo de condições favoráveis para se decidir aumentar tamanho desse sistema, gerando mais energia, de acordo com a necessidade, ou até mesmo investir na instalação de novos sistemas fotovoltaicos ou replicar um sistema em outros *campi*. Essas condições poderão ser confirmadas através de uma análise de viabilidade que se utilize de valores estimados, pode ser crucial para a identificação das possibilidades de replicação dos sistemas fotovoltaicos existentes.

4.3.4 Análise Comparativa

Finalizando esta discussão a respeito do desempenho operacional do sistema IFPI-FLORIANO, é mostrado na Tabela 18 um comparativo entre este sistema e outros instalados em outras instituições públicas de ensino de locais distintos do Brasil com relação aos seus índices de mérito.

Gomes *et al* (2015) apresentam os resultados referentes ao SFCR de 2,16 kWp que se encontra instalado nas dependências da Universidade Federal de Uberlândia (UFV NUPEP-FEELT-UFU). O sistema descrito por Urbanetz Junior, Casagrande Junior e Tiepolo (2014b) tem uma potência instalada de 2,1 kWp e encontra-se instalado no telhado do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), na cidade de Curitiba. Já o sistema descrito por Buiatti *et al* (2016) instalado na Reitoria do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), localizada na cidade de Natal tem uma potência instalada total de 56,4 kWp.

Tabela 18 – Comparativo entre sistemas instalados instituições públicas de ensino de locais distintos do Brasil

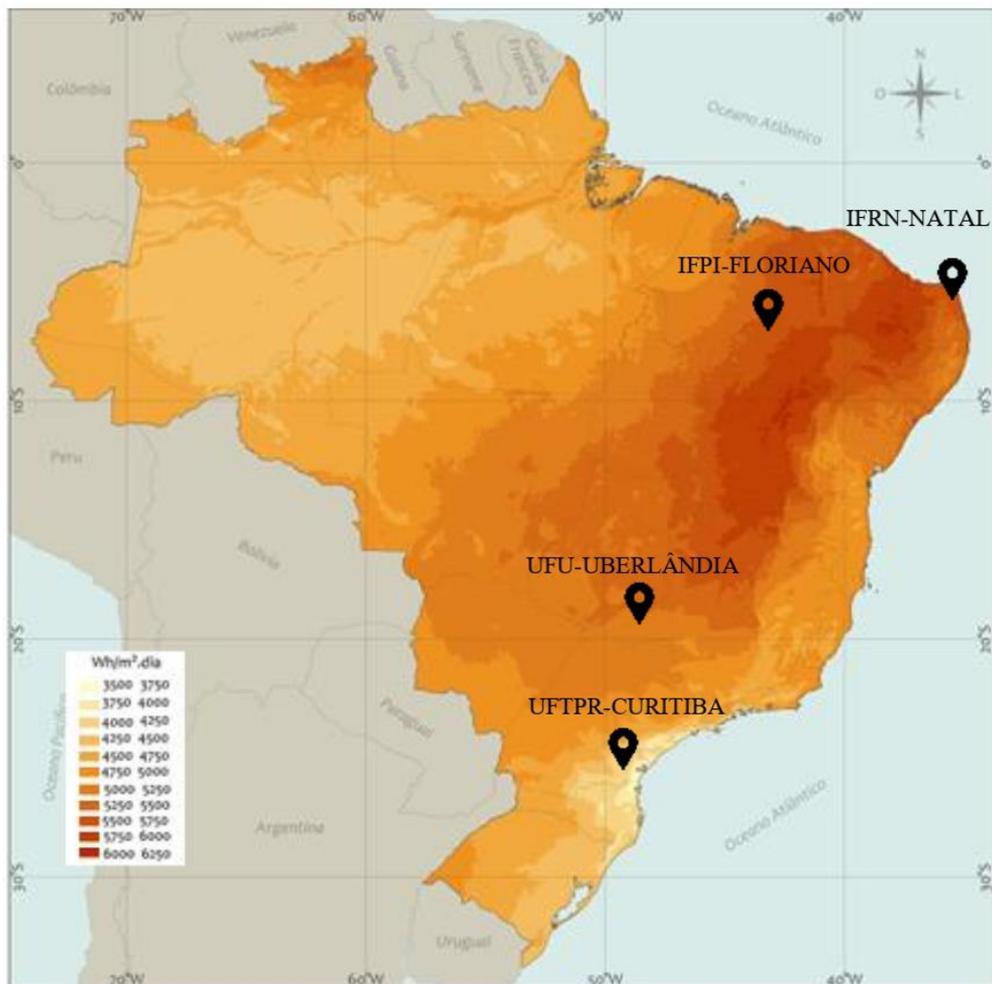
Parâmetros	IFPI FLORIANO	UTFPR CURITIBA	UFU UBERLÂNDIA	IFRN NATAL
Período de Operação	2016-2017	2012	2014	2014
Potência Instalada (kWp)	171,6	2,1	2,16	56,4
Geração Anual (kWh)	256.218,84	2.444,00	3.077,11	92.964,00
Produtividade (kWh/kWp)	1.493,12	1.163,81	1.454,21	1.648,31
Fator de Capacidade (%)	17,04	13,25	16,26	18,82
Desempenho Global (%)	73,54	65,98	69,18	85,24

Fonte: Urbanetz Junior; Casagrande Junior; Tiepolo, 2014b, Gomes *et al.*, 2015 e Buiatti *et al.*, 2016.

Ao comparar os parâmetros de desempenho de todos os sistemas, o sistema IFPI-FLORIANO apresenta um desempenho operacional superior a praticamente todos eles. Nos casos do sistema instalado no Escritório Verde da UFTPR-CURITIBA e do sistema UFU-UBERLÂNDIA, isso se verifica pelo fato de estarem localizados em regiões do Brasil que recebem menores índices de radiação solar durante o ano, como pode ser visto na Figura 30, retirada da última versão do ABES (PEREIRA *et al*, 2017).

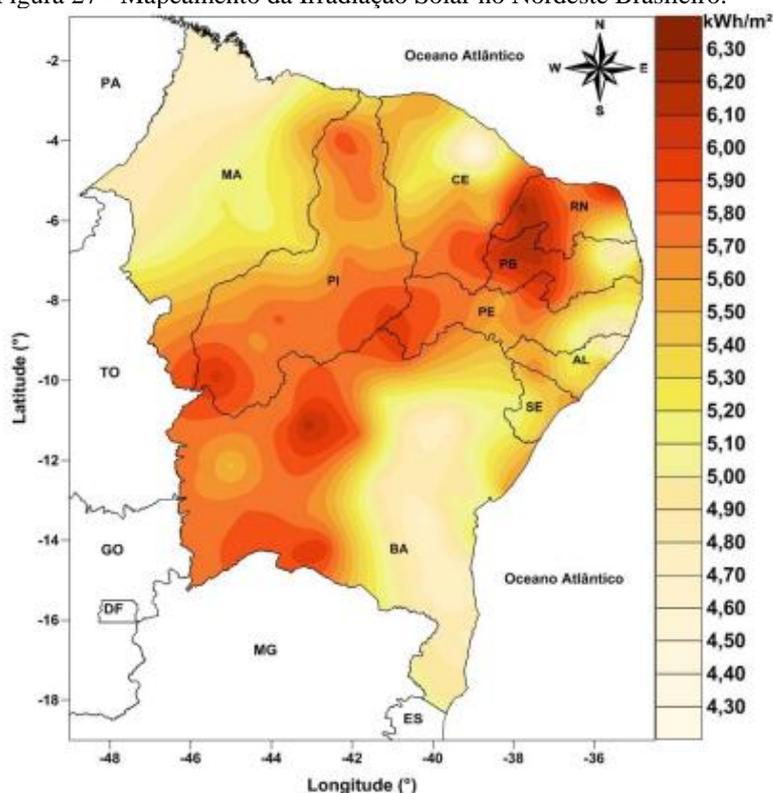
Porém, no caso do sistema IFRN-NATAL, os valores dos parâmetros de desempenho apresentam-se maiores que os referentes ao sistema IFPI-FLORIANO. Ademais, analisando a Figura 26, percebe-se que os dois sistemas se situam em regiões do mapa que apresentam os mesmos índices de irradiação solar. Dessa maneira, faz-se necessária a análise do mapa visto na Figura 27, retirada dos estudos de Lima (2015). Pode-se facilmente verificar que Floriano e Natal situam-se em regiões que apresentam índices de radiação solar distintos.

Figura 26 – Localização geográfica dos SFCCR comparados na Tabela 16.



Fonte: Adaptado de Pereira *et al* (2017)

Figura 27 - Mapeamento da Irradiação Solar no Nordeste Brasileiro.



Fonte: Lima (2015).

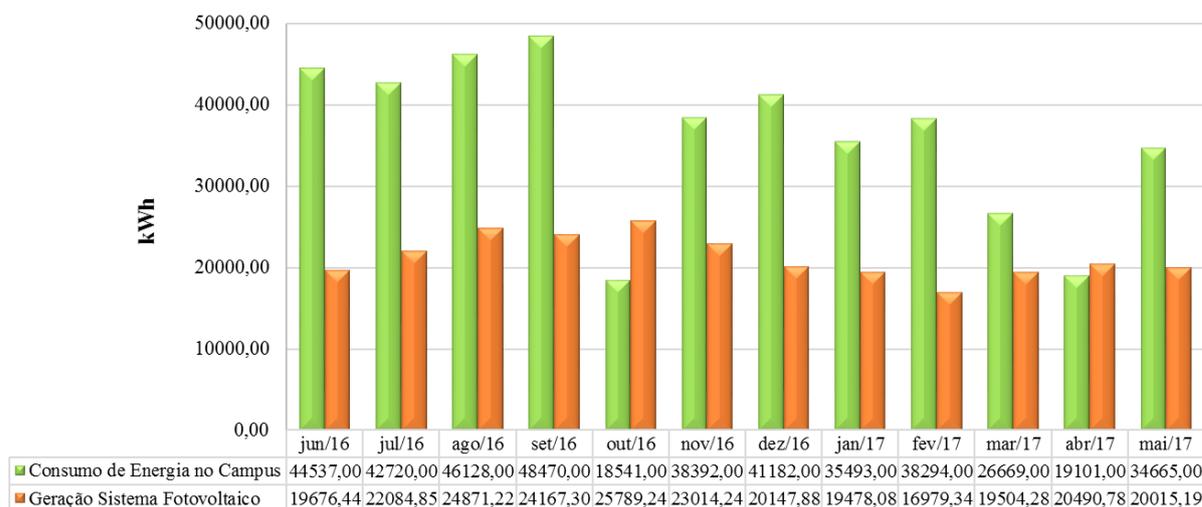
Acredita-se que pelo fato de o sistema IFRN-NATAL estar instalado em uma região litorânea, onde os valores de velocidade do vento são bem maiores do que a maioria das regiões interioranas, como é o caso do Sistema IFPI-FLORIANO, os sistemas fotovoltaicos trabalhem em condições melhores de resfriamento, diminuindo assim as perdas por temperatura. Vale a pena ressaltar que nos casos dos sistemas apresentados por Buiatti *et al* (2016) e Gomes *et al* (2015), os cálculos foram feitos tendo como base os dados do Projeto SWERA. Já no caso do sistema descrito por Urbanetz Junior, Casagrande Junior e Tiepolo (2014b), a PR foi calculada através de índices de radiação fornecidos por uma estação meteorológica do INMET, instalada próxima ao sistema fotovoltaico.

4.4 Análise de Viabilidade Econômica

O consumo mensal do *campus* e a produção mensal do sistema IFPI-FLORIANO, referentes ao primeiro ano de operação, encontram-se descritos na Figura 28, para efeitos de comparação. Destacam-se no gráfico apresentado os meses de setembro e outubro de 2016 que tiveram o maior e o menor consumo de energia, respectivamente, e os meses de outubro de 2016 e fevereiro de 2017, com a maior e a menor geração de energia fotovoltaica,

respectivamente. Ademais, destaca-se novamente o mês de outubro de 2016 além do mês de abril de 2017, cuja geração de energia foi maior que o consumo do *campus*, em decorrência das férias escolares que, conforme será mostrado, impacta na diminuição do consumo de energia.

Figura 28 – Consumo mensal do *campus* e Geração do Sistema Fotovoltaico no primeiro ano de funcionamento.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que no período em análise, o consumo total no *campus* Florianiano foi de 434.192,00 kWh, sendo que o consumo médio de energia por mês foi de 36.182,67 kWh. Analisando o gráfico, percebe-se que o consumo mensal é mais elevado em alguns meses do ano, o que se justifica com a análise da Figura 19. Como pode ser observado, o período que vai de agosto a outubro, é o mais quente do ano, fato justificado pelos altos índices de irradiação solar. Este fato propicia um incremento na temperatura ambiente fazendo com que o consumo de determinados equipamentos elétricos, como os equipamentos de ar condicionado, aumente por conta da necessidade de mantê-los em funcionamento por mais tempo.

Segundo Souza *et al* (2013), a temperatura do ar é a variável climática mais importante que afeta o consumo de energia. Uma mudança de temperatura influencia as condições de conforto térmico de determinada região produzindo assim mudanças de comportamento do consumidor e, portanto, mudanças no consumo de energia. Além da temperatura, outras variáveis climáticas, como a umidade e a velocidade dos ventos, também influenciam a refrigeração e sensação de conforto térmico.

Segundo Lamberts *et al.* (2014) o consumo clássico de um prédio público, mostra que 48% da energia consumida por eles é utilizada pelos Sistemas de Climatização e outros 24% são utilizados pelo Sistema de Iluminação, cabendo o restante do consumo às bombas d'água e elevadores e às tomadas de uso geral. No caso do *campus* Florianiano do IFPI, como se

trata de uma instituição de ensino, a carga predominante é composta por aparelhos de ar condicionado e pelo sistema de iluminação do *campus*. Também existem alguns computadores referentes à parte administrativa da instituição e aos laboratórios de informática. Porém os laboratórios são de uso pontual.

Viana *et al.* (2012) afirmam que o ar condicionado, nos dias de verão, é o maior responsável individual pela ocorrência de pontas de demanda de energia elétrica em instalações comerciais. No período da tarde, quando o ar condicionado é mais necessário, para manter temperaturas confortáveis, este aumento da demanda de energia soma-se à demanda causada pela iluminação, equipamentos, computadores, entre outros.

Porém, analisando o mês de outubro, que se encontra dentro do período mais quente do ano, verifica-se que neste mês o *campus* apresentou o mais baixo consumo. Em consulta ao calendário acadêmico do *campus*, disponível no site da instituição, verifica-se que no mês outubro de 2016, entre os dias 03 e 27, aconteceram as férias letivas entre os períodos letivos 2016.1 e 2016.2. Situação semelhante aconteceu nos meses de março e abril de 2017, pois neste período ocorreram as férias que marcam o encerramento do ano letivo de 2016, justificando-se também o baixo consumo de energia elétrica nestes meses, pois no *campus* permaneceram em funcionamento apenas os seus setores administrativos e a iluminação noturna.

Na Tabela 19 é apresentado um resumo da análise de viabilidade econômica. Considerando o benefício gerado pelo projeto (valor de R\$ 0,331276/kWh), o mesmo trouxe uma economia de R\$ 84.879,15 para a instituição, devido a economia de 256.218,84 kWh de energia elétrica. Este valor representa uma economia anual de energia da ordem de 59,01 % em relação ao consumo de energia do *campus*.

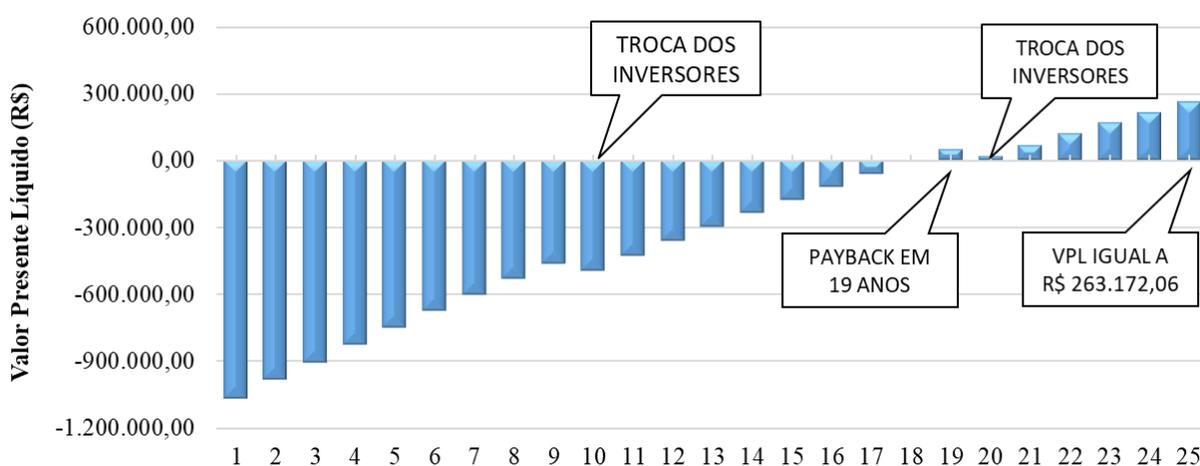
Tabela 19 – Análise de viabilidade econômica do Sistema IFPI-FLORIANO.

Dados da Análise	Valor
Investimento Inicial (R\$)	R\$ 1.150.000,00
Economia de Energia Anual (kWh)	256.218,84
Economia de Energia Anual (%)	59,01
Economia de Energia Anual (R\$)	R\$ 84.879,15
Benefício do Projeto (R\$/kWh)	0,331277
Taxa Básica de Juros Anual (%)	10,93
Reajuste Anual da Tarifa de Energia (%)	9,41
Taxa de Desconto (%)	1,52
Taxa Interna de Retorno (%)	1,91
Valor Presente Líquido (R\$)	R\$ 263.172,06
Relação Custo Benefício	4,37
<i>Payback</i>	19 anos

Fonte: Próprio autor.

Com base nessa análise, o valor investido inicialmente retornará para a instituição em 19 anos (*payback*) e após os 25 anos de vida útil do projeto, a instituição deixaria de desembolsar R\$ 263.172,06, a uma TIR de 1,91% ao ano, somente com a economia de energia elétrica a ser vista como abatimento nas faturas de energia, uma vez que na análise econômica, deixar de gastar é o mesmo que lucrar. Porém, observa-se que o projeto apresenta uma relação custo benefício bem maior que 1, o que mostra que ao final da vida útil do sistema o valor das entradas de capital após o pagamento do sistema não supera o valor inicial investido. Na Figura 29 pode ser vista a projeção do fluxo de caixa através da evolução do Valor Presente Líquido durante a vida útil do projeto e o momento em que o sistema se paga (*Payback*).

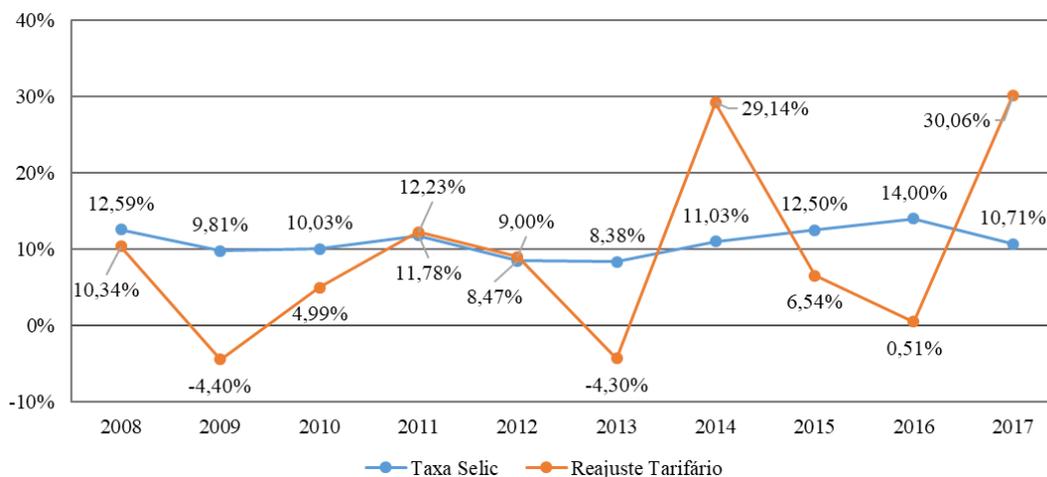
Figura 29 - Evolução do Valor Presente Líquido durante a vida útil do projeto.



Fonte: Próprio autor.

Ademais, considerou-se como taxa de desconto a diferença entre o reajuste médio da SELIC (10,93%) e o reajuste médio da tarifa de energia da concessionária (9,41%) nos últimos dez anos, parâmetros que variam anualmente, conforme pode ser visto na Figura 30, e refletem a decisões políticas, como o que ocorreu em 2012 quando as tarifas foram mantidas artificialmente baixas, sem o reajuste necessário para manter a saúde financeira das concessionárias, e o que ocorre em 2017 com a privatização da Eletrobrás que traz mais incertezas ao setor.

Figura 30– Variação da Taxa SELIC e do reajuste da Tarifa de Energia no Piauí.



Fonte: BCB, 2017 e EDP-PI, 2017.

Analisando-se todos esses fatores, questiona-se a viabilidade econômica desse sistema com os resultados obtidos, sobretudo ao se verificar outros estudos de viabilidade econômica que envolvem redução do consumo de energia através de ações de eficiência energética que também se enquadram no estabelecido pela Portaria nº 23/2015 do MPOG, em instituições de ensino do estado do Piauí que se demonstram muito mais viáveis. Dessa maneira, por terem uma relação custo-benefício bem menor, ou por apresentem VPL de mesma ordem dentro de períodos de vida útil consideravelmente menor, outros projetos poderiam ser dados como prioritários pela administração da instituição.

Como exemplo, tem-se o estudo de Silva *et al.* (2017a) que visava a eliminação das perdas evitáveis (decorrentes do atraso no pagamento das faturas, energia reativa excedente e demanda de ultrapassagem) no *campus* Teresina-Central (CATCE) do IFPI (da mesma instituição do sistema estudado), com o *Payback* em menos de um ano, cujos resultados encontram-se descritos na Tabela 20.

Tabela 20 – Viabilidade Econômica das perdas evitáveis no CATCE do IFPI

Dados da Análise	Valor
Investimento inicial	R\$ 6.000,00
Economia Anual	R\$ 55.222,65
Vida útil	5 anos
Inflação Anual	8,26%
Reajuste Anual das tarifas	9,41%
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 270.053,14
Payback	0,17 anos
Relação Custo Benefício	0,02

Fonte: Silva *et al.*, 2017a.

Assim, para Yang e Blyth (2007), essas análises, baseadas na interpretação desses indicadores determinísticos, são largamente utilizadas por setores tradicionais da economia. Entretanto, esta metodologia não pode quantificar totalmente os riscos e incertezas relacionadas ao preço da energia, à política dos governos sobre as alterações climáticas e ao regime internacional no mecanismo de mudança climática, que representam incertezas para o investimento do setor de energia, principalmente, quando se trata de projetos de alta complexidade ou quando o Fluxo de Caixa for por um período mais extenso.

Vale a pena destacar ainda que, mesmo possuindo viabilidade técnico-econômica o projeto deve possuir aderência estratégica, avaliando se o mesmo foi desenvolvido para atender ou não às estratégias do plano da entidade, em especial os de longo prazo e, conseqüentemente, está alinhado a sua missão e visão, o que pode ser verificado analisando-se o último PDI do IFPI (IFPI, 2014). De acordo com Silva (2017b) As IES devem ser exemplo de sustentabilidade para toda a comunidade e incentivar mudanças concretas na realidade social não só através de sua atividade fim (ensino, pesquisa e extensão), mas também com a articulação da gestão e a infraestrutura das edificações podendo ainda ser encaradas como Projetos de Investimento de Aderência Estratégica, uma vez que a sustentabilidade deve estar alinhada com a missão e a visão dessas organizações

4.5 Possibilidades de replicação do sistema

Para a identificação das possibilidades de replicação do sistema fotovoltaico no IFPI, foi levantado o consumo de todos os *campi* da instituição referentes ao horário de ponta e fora-ponta através das faturas de energia relativas ao ano de 2017, como pode ser visto na Tabela 21. O consumo total da instituição neste período foi de 7.108.876 kWh, sendo que 1.003.561 kWh foram consumidos no horário de ponta e 6.089.761 foram consumidos no horário fora de ponta.

Tabela 21 – Consumo, em kWh, dos *campi* do IFPI no ano de 2017.

Campus	Ponta	Fora Ponta	Consumo Total	Porcentagem
Teresina Central	323.237	1.881.324	2.204.561	26,73%
Teresina Zona Sul	81.918	490.456	572.374	8,05%
Piripiri	67.424	421.184	488.608	6,87%
Parnaíba	62.725	417.944	480.669	6,76%
Picos	79.037	375.253	454.290	6,39%
Floriano	83.796	292.618	376.414	5,29%
São Raimundo Nonato	52.840	287.847	340.687	4,79%

(Continuação)

Campus	Ponta	Fora Ponta	Consumo Total	Porcentagem
Uruçuí	45.203	279.119	324.322	4,56%
Corrente	39.789	269.755	309.544	3,35%
Paulistana	34.012	230.102	264.114	3,72%
Campo Maior	11.337	239.790	251.127	3,53%
Oeiras	29.910	206.711	236.621	3,33%
São João Do Piauí	33.531	202.045	235.576	3,31%
Pedro II	26.528	203.028	229.556	3,23%
Valença Do Piauí	29.419	198.601	228.020	3,21%
Cocal	19.827	194.420	214.247	3,01%
Angical	28.069	159.222	189.035	2,85%
Total	1.003.561	6.089.761	7.108.876	100,00%

Fonte: Próprio autor.

Conforme foi descrito no item 3.4, a amostra escolhida para a replicação do sistema fotovoltaico seria composta pelos *campi* mais antigos desde a mudança de CEFET-PI para IFPI ocorrida em 2008, sendo estes: Teresina Central, Teresina Zona Sul, Floriano, Picos e Parnaíba. Analisando a Tabela 21, verifica-se que os *campi* mais antigos da instituição são os que apresentam o maior consumo de energia elétrica, à exceção do *campus* Piripiri, que não faz parte dos *campi* mais antigos, mas também apresenta um alto consumo. Assim a amostra será composta pelos *campi* Teresina Centra, Teresina Zona Sul, Piripiri, Parnaíba e Picos. Estes cinco *campi* representam 54,80% do consumo total de todo o IFPI. Na tabela 22 pode ser visto o consumo mensal dos *campi* que compõem a amostra para o ano de 2017.

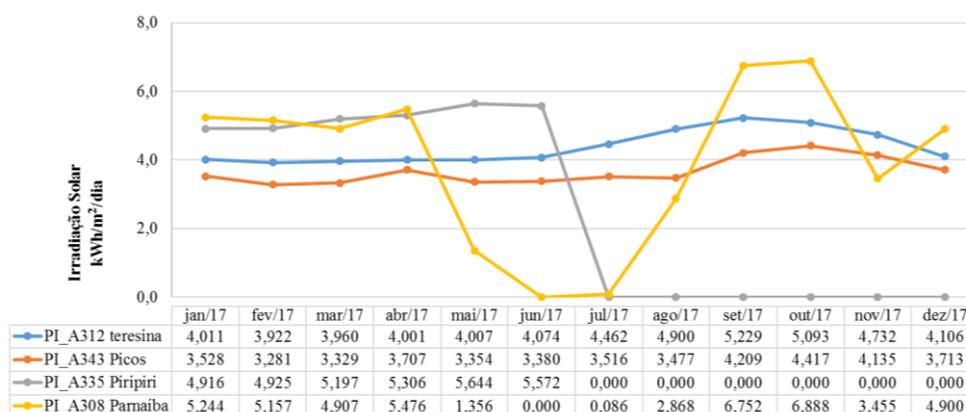
Tabela 22 - Consumo mensal, em kWh, dos *campi* que compõem a amostra selecionada no ano de 2017.

Mês/Ano	THE Central	THE Zona Sul	Piripiri	Parnaíba	Picos
jan/17	190.205,00	47.697,00	40.716,00	40.055,00	37.857,00
fev/17	158.282,00	45.879,00	35.063,00	45.844,00	51.948,00
mar/17	175.015,00	31.421,00	45.720,00	34.286,00	27.712,00
abr/17	138.021,00	54.253,00	43.616,00	43.954,00	43.509,00
mai/17	138.880,00	56.197,00	45.909,00	45.628,00	44.679,00
jun/17	202.967,00	47.603,00	45.638,00	42.095,00	37.745,00
jul/17	196.362,00	46.484,00	43.164,00	41.944,00	34.086,00
ago/17	234.243,00	36.132,00	43.665,00	29.279,00	22.379,00
set/17	216.941,00	39.673,00	30.890,00	35.224,00	30.017,00
out/17	164.064,00	48.088,00	40.507,00	42.840,00	41.204,00
nov/17	205.286,00	44.488,00	34.840,00	38.494,00	39.115,00
dez/17	184.295,00	74.459,00	38.880,00	41.026,00	44.039,00
Total Anual	2.204.561,00	572.374,00	488.608,00	480.669,00	454.290,00

Fonte: Próprio autor.

Para a realização da replicação, foi feito inicialmente um estudo da irradiação solar das cidades onde os *campi* selecionados para a amostra se situam. Na Figura 31 podem ser vistos os valores mensais de irradiação solar global fornecidos pelas estações meteorológicas do INMET instaladas nas respectivas cidades. As curvas relativas às estações de Parnaíba e Piripiri apresentam valores zerados pelo fato de que, nos respectivos períodos, as estações meteorológicas não efetuaram medições, por estar em manutenção ou por seus equipamentos estarem danificados. Dessa maneira, foi feito o estudo de viabilidade econômica apenas para os *campi* Teresina Central, Teresina Zona Sul e Picos. Estes *campi* juntos representam uma porcentagem considerável de 41,17% em relação ao consumo total da instituição.

Figura 31 - Irradiação Solar Global para as cidades que compõem a amostra.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 23 é visto um resumo da análise de viabilidade econômica da replicação do sistema fotovoltaico nos *campi* que compõem a amostra selecionada para o estudo. Foi considerado o mesmo valor para a aquisição do sistema fotovoltaico, porém para cada *campus* o valor do benefício dado pelo projeto (preço considerado para o kWh consumido) foi diferente, sendo calculado pela média dos valores cobrados por kWh consumido no horário fora-ponta.

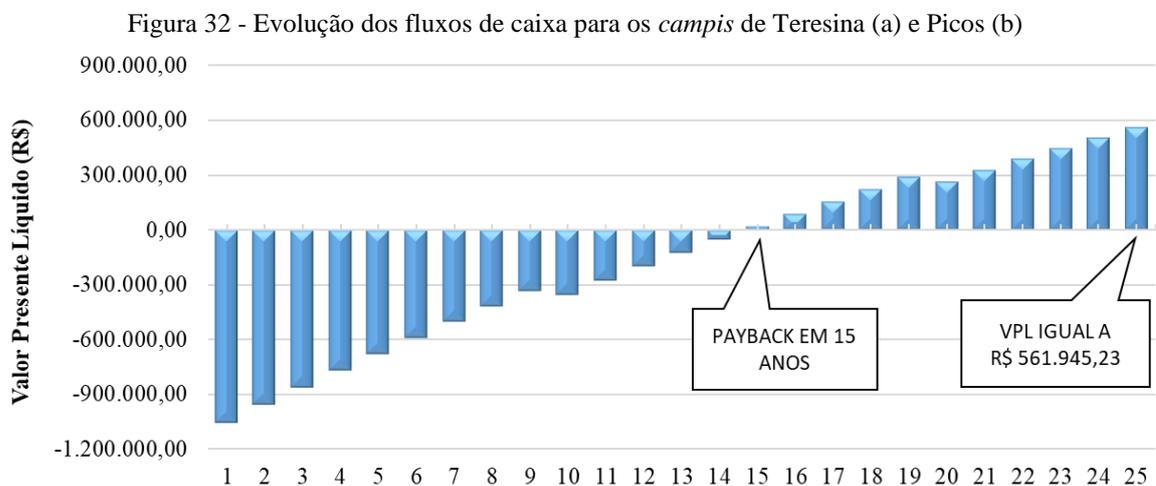
Tabela 23 - Resumo da análise de viabilidade econômica da replicação do sistema fotovoltaico.

Dados da Análise	Teresina Central	Teresina Zona Sul	Picos
Economia de Energia Anual (kWh)	270.188,22	270.188,22	226.692,24
Economia de Energia Anual (%)	12,26%	47,20%	49,90%
Economia de Energia Anual (R\$)	R\$ 100.757,31	R\$ 100.757,31	R\$ 82.495,50
Benefício do Projeto (R\$/kWh)	R\$ 0,372915	R\$ 0,372915	R\$ 0,363910
Taxa Interna de Retorno	3,87%	3,87%	1,60%
Valor Presente Líquido (R\$)	R\$ 561.945,23	R\$ 561.945,23	R\$ 218.319,82
Relação Custo Benefício	2,05	2,05	5,27
Payback (Anos)	15 anos	15 anos	19 anos

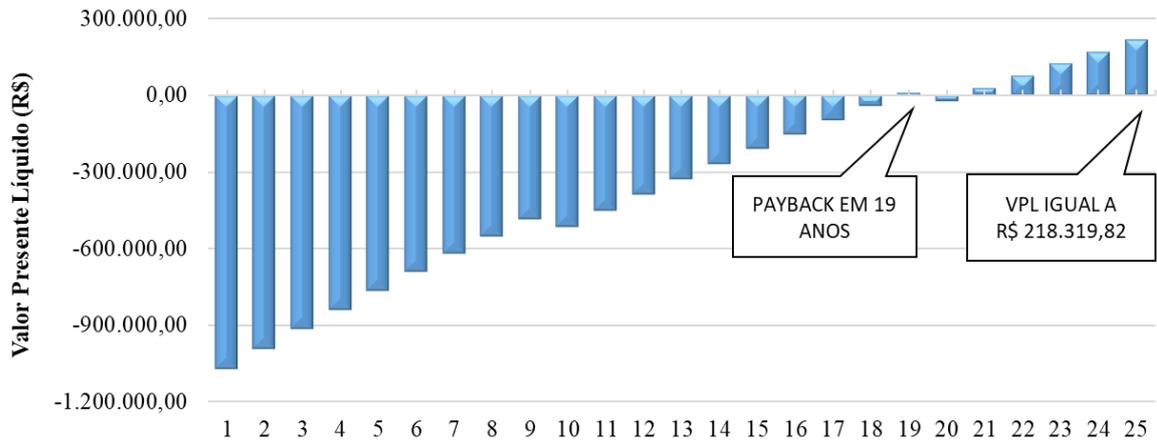
Fonte: Próprio autor.

A análise de viabilidade destes *campi*, revelou uma economia anual no consumo de energia elétrica do IFPI de 767.068,68 kWh, caso os sistemas tivessem sido instalados e operado todo o ano de 2017. Dessa maneira, esta economia representa uma porcentagem de 10,79% em relação a todo o consumo da instituição neste período, que se reflete em R\$ 284.010,12 economizados nas faturas de energia. Analisando individualmente cada *campus*, o sistema fotovoltaico traria uma economia anual de energia elétrica da ordem de 12,26% no consumo de energia do *campus* Teresina Central (270.185,40 kWh), sendo que ao final da vida útil do projeto, a instituição teria deixado de gastar um total de R\$ 561.945,23 a uma Taxa Interna de Retorno de 3,87%. Assim, o sistema se pagaria dentro de um período de 15 anos. Para o *campus* Teresina Zona Sul a análise revelou os mesmos valores, porém, a economia de energia em porcentagem seria da ordem de 47,20%, tendo em vista que se trata de um *campus* menor porte, tanto em termos físicos quanto em consumo de energia.

Analisando a Tabela 23, pode-se perceber que os *campi* Teresina Central e Teresina Zona Sul apresentam os mesmos valores encontrados para análise de viabilidade econômica. Isto ocorre porque a análise de viabilidade é realizada tendo como base os valores mensais estimados de energia a ser gerada pelo sistema fotovoltaico, que, por sua vez, são calculados tendo como base os valores mensais de irradiação solar global, de acordo com a Equação 5. Como os *campi* estão situados na mesma cidade. Já para o *campus* Picos, ter-se-ia deixado de pagar um total de R\$ 218.319,82 ao final da vida útil do projeto, com uma taxa de 1,60%. O sistema se pagaria dentro do período de 19 anos. Dessa maneira, a economia anual de energia de 226.692,24 kWh representaria 49,90% em relação ao consumo anual do *campus*. Na Figura 32 podem ser vistas as evoluções dos fluxos de caixa para os sistemas instalados nos *campi* da cidade de Teresina e de Picos.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Vale a pena ressaltar que em todos os projetos analisados a relação custo benefício foi maior que 1,00. Assim, uma maneira de definir as prioridades dos projetos a serem implantados tendo em vista os que apresentarem a RCB menor dentre todas, trazendo assim mais retorno financeiro para instituição. Assim o principal benefício trazido pela replicação será valor economizado com energia elétrica que poderia ser destinado a outras necessidades da instituição como capacitação de professores, estruturação de laboratórios e compra de livros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabendo que a instalação de um sistema fotovoltaico pode ser uma alternativa viável e diferenciada nas ações de eficiência energética que devem ser adotadas pelas instituições de ensino, esta pesquisa buscou realizar uma análise desta fonte para comprovar a viabilidade de instalação e expandir a sua utilização dentro do universo das instituições de ensino *multicampi*. Assim, teve como objetivo geral fornecer subsídios para os gestores de instituições de ensino de caráter *multicampi* analisarem a viabilidade técnico-econômica da replicação de sistemas fotovoltaicos, de modo a evitar grandes margens de erros nas estimativas de geração de energia elétrica.

Para atingir este objetivo buscou-se Analisar o desempenho operacional do sistema instalado no *campus* Floriano do IFPI através dos índices de mérito Produtividade Final, Desempenho Global e Fator de Capacidade; comparar as estimativas de geração fornecidas pelos *softwares* dedicados Solergo e PVsyst e as estimativas calculadas manualmente utilizando dados de irradiação solar provenientes do banco de dados do Projeto SWERA, da segunda edição do ABES e dados de medição fornecidos pelo INMET, com os dados reais de geração do sistema instalado no *campus* Floriano do IFPI; e, por fim, avaliar a viabilidade econômica do sistema instalado no *campus* Floriano do IFPI e de oportunidades de replicação sistema em outros *campi* da instituição como uma medida de eficiência energética.

Para o cálculo dos índices de mérito do sistema fotovoltaico, mais especificamente o do Desempenho Global (*Performance Ratio*), fez-se necessário um estudo comparativo entre as fontes de dados de irradiação solar citadas, tendo em vista que o sistema instalado no *campus* Floriano do IFPI não possuía uma estação de medição própria, conforme estabelecido na IEC 61724. Assim o estudo foi necessário para se determinar se os dados obtidos destas fontes poderiam ser utilizados com confiança para o cálculo destes índices, em sistemas instalados no estado do Piauí. Verificou-se que os dados de radiação obtidos através das estações meteorológicas do INMET próximas do local onde o sistema encontra-se instalado não são dados confiáveis para o cálculo deste índice.

A análise de desempenho do sistema fotovoltaico instalado no IFPI demonstrou viabilidade técnica. Dessa maneira, pode ser uma alternativa energética para as instituições de ensino reduzirem custos com energia elétrica no estado do Piauí. Ao analisar os índices de irradiação solar para cidade de Floriano, verificou-se valores superiores a diversos países da Europa como a Alemanha, país onde a utilização de SFV já está consolidada. Assim, ao analisar a geração do primeiro ano de instalação do SFV, verificou-se que o sistema apresenta um

excelente desempenho, com índices de mérito satisfatórios, a saber: Fator de Capacidade de 17,04%, Produtividade Final de 1.493,12 kWh/kWp e Desempenho Global de 73,54 %. Assim, tendo em vista que a cidade se encontra na região do estado que recebe os menores índices de irradiação solar e que o sistema apresentou um desempenho satisfatório no seu primeiro ano de operação, pode-se concluir que o Estado do Piauí possui vasto potencial para a utilização da energia solar fotovoltaica.

Também foi verificado que a metodologia de cálculo, descrita pela Equação 5, pode ser uma alternativa a ser utilizada nas análises de viabilidade econômica tanto no caso de instalações de novos sistemas quanto com vistas a replicação de sistemas fotovoltaicos existentes através das métricas utilizadas na engenharia econômica, tais como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, *Payback* e Relação Custo-Benefício, por apresentar uma estimativa precisa e coerente com a realidade. Ademais, percebeu-se que a escolha errada do banco de dados de irradiação, a ser utilizado no cálculo das estimativas de geração, pode trazer prejuízos tanto para a instituição, como, por exemplo, orçamentação superestimada, o que pode comprometer o tempo de retorno do investimento, quanto para as instalações como sobreaquecimento dos condutores, quedas de tensão e mal funcionamento dos dispositivos de proteção utilizados.

Para a análise de viabilidade econômica da implantação de SFCR, deve-se considerar: o investimento inicial, o potencial de geração de energia elétrica, os custos de manutenção, a tarifa de energia elétrica (valores e tipos) e da taxa de desconto (diferença entre a taxa básica de juros e o reajuste anual da tarifa de energia elétrica). Os resultados apresentados nesse trabalho colocaram em xeque a viabilidade econômica desse sistema que, mesmo possuindo aderência estratégica por estarem alinhados com a missão e a visão da instituição, e apresentando um VPL de R\$ 263.172,06 advindos de uma economia anual de R\$ 84.879,15 a uma taxa de 1,91% ao ano. Porém, possui uma RCB igual a 4,37, muito maior que outras ações de eficiência energética propostas para algumas instituições de ensino do Piauí, com o retorno do investimento inicial de R\$ 1.150.000,00 devendo vir somente no ano de 2035 (19 anos após sua instalação). Vale a pena ressaltar que foram considerados também uma queda de desempenho de 0,8% ano, devido ao desgaste natural dos módulos fotovoltaicos, e custos de manutenção no valor de 10% do investimento inicial, feito a cada 10 anos (troca dos inversores do sistema).

Com base nessa análise pôde-se concluir através de uma análise quantitativa que o SFCR instalado no *campus* Floriano do IFPI não possui viabilidade econômica, o que pôde ter sido causado pelo alto custo de implantação ou pelo baixo retorno financeiro, devendo ser

objeto de pesquisas posteriores. Entretanto, limitar os benefícios relacionados a SFCR apenas à redução dos gastos com a energia pode conduzir a decisões erradas, uma vez que os co-benefícios para o meio ambiente ou para as atividades de ensino, pesquisa e extensão, considerando a atividade fim da instituição, podem ser tão relevantes quanto.

A identificação das possibilidades de replicação do sistema fotovoltaico no IFPI, foi feita em uma amostra contendo os *campi* considerados mais antigos, tendo em vista a mudança de CEFET-PI para IFPI ocorrida em 2008 e também o que apresentavam o consumo de energia elétrica mais representativo dentro da instituição. Assim, foram analisados os *campi* Teresina Cental e Zona Sul, Picos, Parnaíba e Piripiri. A estimativa de energia a ser produzida pelos sistemas foi feita com base na irradiação solar de cada cidade obtidos através as estações meteorológicas do INMET. Porém, os dados das estações de Parnaíba e Piripiri estavam incompletos por conta de defeitos nas estações.

Assim, a análise dos três *campi* remanescentes da amostra mostrou que a instalação do sistema traz uma economia anual no consumo de energia elétrica do IPFI 767.068,68 kWh, caso os sistemas tivessem sido instalados e operado todo o ano de 2017, que se reflete em R\$ 284.010,12 economizados nas faturas de energia. Porém, vale a pena ressaltar que na indisponibilidade desses dados, pela não existência de estações meteorológicas na cidade onde o sistema foi instalado, ou no caso de dados não confiáveis por defeitos nas estações existentes, os *softwares* são uma boa alternativa para estimar a produção do sistema e realizar uma análise de viabilidade para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Assim, após a apresentação dos resultados e da discussão feita, tendo em vista que foi o primeiro estudo de cunho técnico realizado no sistema fotovoltaico do *campus* Floriano do IFPI, primeira usina de minigeração do estado do Piauí a entrar em operação, espera-se que este trabalho possa trazer contribuições para pesquisas futuras que possam ser realizadas envolvendo a análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos, principalmente os instalados nas instituições de ensino do estado do Piauí, tendo em vista o grande potencial para a utilização desta fonte no estado.

Dessa maneira, tendo em vista as hipóteses de pesquisa levantadas no início deste estudo, a seguir é apresentado o Quadro 1 com o resumo das hipóteses de pesquisa, resultados e alguns breves comentários.

Quadro 1 – Resumo das hipóteses de pesquisa, resultados e comentários.

Hipótese	Resultado	Comentários
Sistemas fotovoltaicos instalados em instituições de ensino de caráter <i>multicampi</i> no estado do Piauí apresentam bons desempenhos operacionais;	Confirmada	O Sistema apresentou um excelente desempenho no seu primeiro ano de operação tendo em vista geração do sistema e os índices de radiação solar referentes ao primeiro ano de operação do sistema.
Com a utilização de dados de irradiação solar global horizontal provenientes de estações meteorológicas próximas é possível estimar a geração anual de energia elétrica mês a mês com valores precisos.	Negada	A utilização de banco de dados provenientes de séries históricas de longos períodos de tempo se mostrou mais eficiente no cálculo das estimativas de geração de energia. A metodologia de estimativa proposta nesta pesquisa se mostrou eficiente desde que se utilize destes dados.
Além dos benefícios decorrentes da economia de energia e da consequente redução de custos, a replicação do sistema fotovoltaico também trará benefícios adicionais para o país e para o planeta.	Confirmada em parte	A replicação do sistema fotovoltaico traz como benefício principal uma economia anual de cerca de 11% no consumo de energia elétrica da instituição, considerando uma amostra de apenas três <i>campi</i> do IFPI. Não foram mensurados os benefícios ambientais que a replicação do sistema trará.

Fonte: Próprio autor.

Por fim, ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados onde se possa verificar a influência da temperatura dos módulos, do fator de dimensionamento dos inversores instalados, uma análise de sombreamento causado pela orientação e posicionamento dos módulos e pela própria volumetria do telhado e dos demais blocos que compõem o *campus* na produtividade do sistema, tendo em vista que também são fatores determinantes na quantidade de energia produzida. Além disso, estes estudos devem envolver a instalação e utilização de equipamentos de medição e monitoramento de modo a analisar cada arranjo fotovoltaico de maneira isolada.

Em se tratando os dados de irradiação solar, percebe-se a necessidade de utilização técnicas de preenchimento de dados faltosos, e como estudo futuro, a aplicação de Inteligência Computacional para prever os dados de irradiação solar, trazendo como resultado principal a elaboração de mapas de irradiação solar para o estado do Piauí. Também existe a necessidade de pesquisas de cunho socioambiental que mensurem os benefícios trazidos pelos sistemas fotovoltaicos para o meio ambiente e sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2012. 171 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.
- AMBO, T.; IKAWA, E.; INZUNZA, R. **Relevant aspects in designing a photovoltaic inverter for industrial and commercial applications**. In: International Power Electronics Conference, IEEE, p. 688-693, 2010.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, 2012.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Brasília, 2015.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. Brasília, 2018. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 03 mai, 2018.
- ANTONIOLLI, A. F. G. **Avaliação do desempenho de geradores fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil**. 2015. 153 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2015.
- APEOP. Associação Piauiense de Empresários de Obras Públicas. **Alternativa: IFPI-Floriano instala sistema de energia solar**. 2016. Disponível em: <http://www.apeop-pi.com.br/noticias/alternativa-ifpi-floriano-instala-sistema-de-energia-solar>. Acesso em: 14 ago 2018.
- BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. **Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 254 p.
- BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 8 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2012. 318 p.
- BARBOSA, E. M. S.; VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Panorama do desenvolvimento tecnológico e mercado de módulos fotovoltaicos. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 16, p. 04.71- 04.80, 2012.
- BARLEV, D.; VIDU, R.; STROEVE, P. Innovation in concentrated solar power. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 95, p. 2703-2725, 2011.
- BCB. Banco Central do Brasil. **Histórico das taxas de juros**. 2017. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp#notas>> Acesso em: set 2017.
- BENEDITO, R. S. **Caracterização da geração distribuída por meio de Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. 2009. 108 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- BERNAL, R.; SILVA, N. N. **O uso do Excel para análises estatísticas**. FSP/USP, 2012.

BHAKTA, S.; MUKHERJEE, V. Performance indices evaluation and techno economic analysis of photovoltaic power plant for the application of isolated India's island. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 20, p. 9-24, 2017.

BRITO, M. C.; SERRA, J. M. Células solares para a produção de energia eléctrica. **Physical Review**, v. 74, p. 230, 2005.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. C. M. **Geração de energia eléctrica: Fundamentos**. São Paulo: Erica, 2012. 158 p.

BUIATTI, G. M.; SILVA JUNIOR F. R.; WANDERLEY, A. C. F.; MACIEL, S. B. **Desempenho de micro e mini usinas fotovoltaicas no Instituto Federal do Rio Grande do Norte**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 6, Belo Horizonte, 2016.

CABRAL, I. S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R. **Energia Solar – Análise comparativa entre Brasil e Alemanha**. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 4. Salvador, 2013

CAMARGOS, R. S. C.; SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G. Método para análise comparativa dos impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica concentrada e pulverizada. **Revista Brasileira de Energia Solar**, ano 7, vol. 7, n. 2, Dez 2016, p.115-122.

CANADIAN SOLAR INC. **CS6P-260/265/270P. PV Module Product Datasheet**. 2016.

CARVALHO, N. H. C. **Modelagem de Processo de Negócio de Geração Solar Fotovoltaica ou Eólica de Pequeno Porte no Contexto da Resolução Normativa ANEEL Nº 482/2012**. 2014. 110f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.

CIDADE VERDE. **IFPI de Floriano substitui quase metade da energia por placas solares**. 2016. Disponível em: <https://cidadeverde.com/floriano/81137/ifpi-de-floriano-substitui-quase-metade-da-energia-por-placas-solares>. Acesso em: 14 ago 2018.

DABOU, R.; BOUCHAFAA, F.; ARAB, A. H.; BOURAIYOU, A.; DRAOU, M. D.; NEÇAIBIA, A.; MOSTEFAOUI, M. Monitoring and performance analysis of grid connected photovoltaic under different climatic conditions in south Algeria. **Energy Conversion and Management**, v. 130, p. 200-206, 2016.

DÁVI, G. A. CAAMANO-MARTÍN, E.; RÜTHER, R.; SOLANO, J. Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 120, p. 19-29, 2016.

DEVABHAKTUNI, V. ALAM, M.; DEPURU, S. S. S. R.; GREEN II, R. C.; NIMS, D.; NEAR, C. Solar energy: Trends and enabling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 555-564, 2013.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DOLARA, A. GRIMACCIA, F.; LEVA, S.; MUSSETTA, M.; FARANDA, R.; GUALDONI, M. Performance Analysis of a Single-Axis Tracking PV System. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 2, n. 4, p. 524-531, out. 2012.

EDP-PI. Eletrobrás Distribuição Piauí. **Tarifas**. 2017a. Disponível em: < <http://www.eletobraspiaui.com/index.php/sua-conta/tarifas/>>. Acesso em nov 2017.

EDP-PI. Eletrobrás Distribuição Piauí. **Relatórios Administrativos**. 2017b. Disponível em: <<http://www.eletobraspiaui.com/index.php/a-empresa/relatorios/relatorios-administrativos/>>. Acesos em: set 2018.

EL CHAAR, L.; LAMONT, L. A.; EL ZEIN, N. Review of photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2165-2175, 2015.

EMMANUEL, M.; AKINYELE, D.; RAYUDU, R. Techno-economic analysis of a 10 kWp utility interactive photovoltaic system at Maungaraki school, Wellington, New Zealand. **Energy**, v. 120, p. 573-583, 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017a. 292 p.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: MME/EPE, 2017b. 271 p.

FERREIRA NETO, O. L.; MELO, R. A.; CANTANHEDE, S. S. T.; SOUZA NETO, A. C.; LIRA, M. A. T.; NETTO, J. M. A. **Diagnóstico da Implantação da Resolução Normativa ANEEL N°482/2012 no Estado do Piauí**. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 10. Gramado- RS, 2016.

FREZATTI, F. **Gestão da Viabilidade Econômico-financeira dos Projetos de Investimento**. São Paulo: Atlas, 2008.

GALVÃO, K. B. O. **Avaliação do desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede no estado do Piauí através da determinação de Índices de Mérito**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Piauí. Teresina, 2018.

GOEL, S.; SHARMA, R. Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 1378-1389, 2017.

GOMES, H. S., MELO, F. C.; FREITAS, L. C. G.; COELHO, E. A. A.; FARIAS, V. J. **Sistemas Fotovoltaicos Distribuídos: Estudo de caso de UFV de 2,16 kWp instalada na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU**. In: Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica, 11, Campina Grande, 2015.

HINRICHS, A. R.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2016. ISBN: 978-85-221-1617-1. 764 p.

HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGEL, J. Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. **Energy Policy**, v. 67, p. 612-617, 2014.

HOPKINS, W. G. Correlation coefficient: a new view of statistics. **Internet Society for Sport Science**, Dunedin, 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

IEC. International Electrotechnical Commission. **Photovoltaic IEC Standard 61724: System Performance Monitoring - Guidelines for Measurement, Data Exchange, and Analysis**. Genebra, 1998.

IFPI. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. **Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI) 2015-2019**. Teresina, IFPI, 2014. 220 p.

IFPI. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. **Sistema Fotovoltaico de Floriano já apresenta resultados econômicos e ambientais**. 2016. Disponível em: <<http://libra.ifpi.edu.br/noticias/sistema-fotovoltaico-de-floriano-ja-apresenta-resultados-economicos-e-ambientais>>. Acesso em: 22 mai. 2018.

IFPI. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. **Relatório de gestão do exercício de 2016. 2017. Disponível** em: <http://libra.ifpi.edu.br/aceso-a-informacao/auditorias/tcu_ifpi-relatorio-gestao-2016.pdf> Acesso em: 23 ago. 2018.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Nota Técnica nº 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET. Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. 2011. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em 25 mai. 2018.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Informação do Consumidor**. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Produtos. Módulos Fotovoltaicos. 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/Modulo_Fotovoltaico.asp>. Acesso em: 25 mai. 2018.

JUCÁ, S. C. S.; CARVALHO, P. C. M. **Métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos: Aplicações em dessalinização**. Duque de Caxias: Espaço Científico Livre Projetos Editoriais, 2013. 84 p.

KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1092-1105, 2016.

KAZEM, H. A.; KHATIB, T.; SOPIAN, K.; ELMENREICH, W. Performance and feasibility assessment of a 1.4 kW roof top grid-connected photovoltaic power system under desertic weather conditions. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 123-129, 2014.

KHALID, A. M.; MITRA, I.; WARMUTH, W.; SCHACHT, V. Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1139-1158, 2016.

KHAN, J.; ARSALAN, M. H. Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 414-425, 2016.

KUMAR, A.; BAREDAR, P.; QURESHI, U. Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1428-1436, 2015.

LABSOL-UFRGS. Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Desenvolvimento de Softwares – SOLARCAD**. 2018. Disponível em: < <http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>. Acesso em 25 mai. 2018.

LABSOL-UFRGS. Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Relatório Técnico LABSOL-UFRGS nº 10/15. Ensaio de Módulo Fotovoltaico Canadian Solar CS6P-260P**. Porto Alegre, 2015.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2014.

LANDEIRA, J. L. F. **Análise técnico-econômica sobre a viabilidade de implantação de sistemas de geração fotovoltaica distribuída no Brasil**. 2013. 135 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

LIMA, F. J. L. **Previsão de Irradiação Solar no Nordeste do Brasil Empregando o modelo WRF Ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs)**. 2015. 216 p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

LIRA, M. A. T. **Sistemas híbridos para o fornecimento de energia elétrica na comunidade roça de baixo, paulistana (PI)**. 2015. 144p. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2015.

LIRA, M. A. T.; MOITA NETO, J. M. Energia Para O Desenvolvimento: O Cenário Piauiense. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, Ano 15, nº 27, p. 104-111, jun, 2013.

MACÊDO, W. N. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2006. 183p. Tese (Doutorado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MAGALHÃES, A. L. C.; SOARES, G. F.; LIRA, M. A. T. **Evolução Histórica do Potencial de Energia Renovável do Piauí**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Semana Oficial da Engenharia e da Agronomia, 74, Foz do Iguaçu. 2016.

MARION, B; ADELSTEIN, J.; BOYLE, K.; HAYDEN, H.; HAMMOND, B.; FLETCHER, T.; CANADA, B.; NARANG, D.; SHUGAR, D.; WENGER, H.; KIMBER, A.; MITCHELL, L.; RICH, G.; TOWNSEND, T. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems.

In: Photovoltaic Specialists Conference, 31, **Conference Record of the Thirty-first IEEE**. p. 1601-1606, 2005

MARTINS, F. R. PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S. **Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA**. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3137-3145.

MAYER, D.; WALD, L.; POISSANT, Y.; PELLAND, S. **Performance prediction of grid-connected photovoltaic systems using remote sensing**. International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Programme. 2008.

MEC. Ministério da Educação e Cultura. **Resolução nº 2, de 15 de junho de 2012**. Brasília, 2012.

MERMOUD, A.; WITTMER, B. **PVsyst User's Manual: PVsyst 6**. Satigny. 2014.

MICHAEL, J. J.; INIYAN, S; GOIC, R. Flat plate solar photovoltaic-thermal (PV/T) systems: A reference guide. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 62-88, 2015.

MODI, A. BÜHLER, F.; ANDREASEN, J. G.; HAGLIND; F. A review of solar energy based heat and power generation systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 1047-1064, 2017.

MONTEIRO JUNIOR, A.; SANTANA, K. G. S.; MACEDO, A. C.; NASCIMENTO O. C. S.; SILVA, S. B. **Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes ângulos de inclinação e azimute localizados em Palmas-TO**. In: Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 14. Uberlândia. 2016.

MONTENEGRO, A. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. 2013. 175 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MORAES, A. M. **Energia Solar Fotovoltaica no Piauí: Barreiras e Potencialidades**. Teresina: EDUFPI, 2013. 190 p.

MORAIS, F. H. M.; SILVA, O. A. V. O. L.; LEITE, C. S.; SOUSA, W. V. C **Diagnóstico para Eficiência Energética no IFPI - Estudo de Caso no Campus Teresina Central**. Anais do Seminário Regional de Educação Ambiental e Escolas Sustentáveis, Teresina, 1 a 4 de junho de 2016. Teresina: EDUFPI, 2016, 182 p.

MORAIS, F. H. M.; SILVA, O. A. V. O. L.; BARBOSA, F. R.; MORAES, A. M. **Avaliação Estudo de Viabilidade do Sistema Fotovoltaico de 36,48 kWp Instalado na Universidade Federal do Piauí**. In: Workshop Piauí Solar, 3; Seminário de Pesquisa em Energia Solar, 2. Teresina, 2017.

MORAIS, F. H. M.; SILVA, O. A. V. O. L.; BARBOSA, F. R.; MORAES, A. M. **Avaliação Técnico-Econômica do Desempenho Operacional do Primeiro Ano de Geração de um SFCR Integrado à Edificação**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7. Gramado, 2018.

MPHOLO, M.; NCHABA, T.; MONESE, M. Yield and performance analysis of the first grid-connected solar farm at Moshoe shoe I International Airport, Lesotho. **Renewable Energy**, v. 81, p. 845-852, 2015.

MPOG, Ministério de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Portaria nº 23, de 12 de fevereiro de 2015**. Brasília. 2015.

MUÑOZ, Y.; VARGAS, O.; PINILLA, G.; VÁSQUEZ, J. Sizing and study of the energy production of a grid-tied photovoltaic system using PVsyst software. **Tecciencia**, v. 12, n. 22, pp. 27-32. 2017.

NASCIMENTO, A. S. **Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro**. 2015. 145f. Dissertação (Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia de Produção) Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2015.

NAKABAYASHI, R., **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica**. Nota Técnica. IEE-USP (LSF), 2015, 58 p.

NEWNAN, D. G.; LAVELLE, J. P. **Fundamentos de Engenharia Econômica**. Rio de Janeiro: LTC. 2000. 359 p.

PANDEY, A. K; TYAGI, V. V.; SELVARAJ, J. A. L; RAHIM, N. A.; TYAGI; S. K. Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 859-884, 2016.

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1625-1636, 2011.

PAVAN, A. M.; CASTELLAN, S.; QUAIA, S.; ROITTI, S.; SULLIGOI, G. **Power electronic conditioning systems for industrial photovoltaic fields: Centralized or string inverters?** In: International Conference on Clean Electrical Power. IEEE, p. 208-214, 2007.

PAVLOVIC, T. M.; RADONJIĆ, I. S.; MILOSAVLJEVIĆ, D. D.; PANTIĆ, L. S. A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3891-3902, 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, JEFFERSON G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.

PHILLIPS, J. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 435-444, 2013.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério das Minas e Energia, 2008. 396 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPREL-CERESB, 2014. 530 p.

PODEWILS, C. Diferenze evidenti. Quel che i gestori degli impianti dovrebbero sapere sui programmi di simulazione. **Photon**, p. 140-147. mai. 2011.

PORTAL ENERGIA. **Energias Renováveis. Maior central solar da América Latina será construída em Piauí, no Brasil**. 18 de agosto de 2016. Disponível em: < <https://www.portal-energia.com/maior-central-solar-da-america-latina-sera-construida-piaui-no-brasil/> > Acesso em: 25 mai. 2018.

PRATS, D. A.; GARCIA, R. A.; ALONSO, J. V. Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras. **Ingeniería Mecánica**, v. 14, n. 1, p. 22-30, jan-abril, 2011.

QUAGLIA, R. B. **Incentivo à Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos: cenários para o setor elétrico brasileiro**. 2010. 114 p. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Energia) - Universidade Federal do ABC. Santo André, 2010.

RAZOYKOV, T. M.; FERKIDES, C. S.; MORE, D.; STEFANAKOS, E.; ULLAL, H. S.; UPADHYAYA, H. M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. **Solar Energy**, v. 85, p. 1580-1608, 2011.

Reich, N. H.; Mueller, B.; Armbruster, A.; Van Sark, W. G.; Kiefer, K., & Reise, C. Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, vol. 20, n. 6, p. 717-726, 2012.

REN21. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2017 Global Status Report**, Paris, 2016. 302 p. ISBN 978-3-9818107-6-9. Disponível em :< http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2018.

ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**. ano 7, v. 7, n. 2, dez, 2016, p. 140-147.

ROUMPAKIAS, E.; STAMATELOS, A. Comparative performance analysis of grid-connected photovoltaic system by use of existing performance models. **Energy Conversion and Management**. v. 150, p. 14-25, 2017.

SÁ, F. N.; SANTOS, F. F. P., MORAES, A. M., LOPES, O. S. **Análise ambiental e econômica do primeiro ano de operação do sistema fotovoltaico de uma instituição federal de ensino no Brasil**. In: Reunión Asades - Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, 10. San Juan, 2017.

SALAMONI, I. T.; RUTHER, R. **O potencial brasileiro da da geração solar fotovoltaica conectada à rede elétrica: análise de paridade de rede**. In: Encontro latino americano de conforto no ambiente construído. 5. Ouro Preto, 2007.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZALES, M. O A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, 2017.

SILVA, O. A. V. O. L.; SANTOS, F. F. P.; BARBOSA, F. R.; LEITE, C. S. Feasibility of Energy Efficiency in universities classrooms: a Case Study in UFPI, BRAZIL. **Espacios**. v. 37, n. 10. p. 10, 2016.

SILVA, O. A. V. O. L.; LEITE, C. S.; MORAIS, F. H. M.; CARDOSO, J. R. A.; SOUSA, W. V. C. Use of Energy Bills for Energy Management in Multicampi Universities. **Revista Espacios**, vol. 38, n.12, p. 20, 2017a.

SILVA, O. A. V. O. L.; BARBOSA, F. R.; SANTOS, F. F. P. **Viabilidade técnico-econômica da eficiência energética em edificações**, Curitiba: Prismas, 2017b. 174 p.

SILVA, L. R. J. R.; SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G. **Análise comparativa das fontes de energias solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica com levantamento de custos ambientais, aplicada ao Distrito Federal**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7, Gramado, 2018.

SINGH, G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. **Energy**, v. 53, p. 1-13, 2013.

SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. **Inversor Fotovoltaico Sunny Tripower 8000TL / 10000TL / 12000TL / 15000TL / 17000TL Manual de Instalação**. STP8-17TL-IA-pt-31 / IMPT-STP10-17TL / Versão 3.1. 2012.

SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. **Inversor Fotovoltaico Sunny Tripower / 15000TL / 20000TL / 25000TL Instruções de Serviço**. STP15-25TL-30-BE-pt-13 / Versão 1.3 2016.

SOMMERFELDT, N.; MADANI, H. Revisiting the techno-economic analysis process for building-mounted, grid-connected solar photovoltaic systems: Part one - Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 1379-1393, 2017.

SOUZA, R. **Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltáica: Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares**. Ribeirão Preto: Bluesol, 114 p. 2012.

SOUZA, L. F. S.; WAZLAWICK, R. S.; OLIVEIRA, C. M.; LUCA, L. A. D. **A influência da temperatura no comportamento da carga elétrica de curto prazo e na precisão da sua previsão**. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 11, Fortaleza, 2013.

SVIECH, V.; MANTOVAN, E. A. Análise de investimentos: controvérsias na utilização da TIR e VPL na comparação de projetos. **Percursos**, v. 1, n. 13, p. 270-298, 2013.

SWERA. Solar and Wind Energy Resource. **Swera (beta release)**. 2017. Disponível em: <<https://maps.nrel.gov/swera/#/?aL=Hj0X2R%255Bv%255D%3Dt&bL=groad&cE=0&IR=0&mC=-5.055463979126611%2C-42.80140399932861&zL=16>> Acesso em set/2017.

TAVARES, M. **Estatística aplicada à Administração**. Universidade Aberta do Brasil. 2007.

TEIXEIRA, P. A. **Com Nova Olinda, Enel Green Power coloca em operação mais 292 MW de energia solar**. Agência Canal Energia, Ribeira do Piauí, 28 de novembro de 2017. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53043099/com-nova-olinda-enel-green-power-coloca-em-operacao-mais-292-mw-de-energia-solar>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

TELES, M. B. **Avaliação operacional das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica de baixa tensão**. 2017. 163 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2017.

TONDOLO, V. A. G.; SCHNEIDER, L. C. A utilização de testes de hipótese paramétricos em pesquisas científicas. **Global Manager**, ano 7, n. 11, dezembro, 2006.

TONIN, F. S. **Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, na cidade de Curitiba**. 2017. 130 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

TORRES, I. C. **Análise do desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos de diferentes tecnologias em clima tropical – estudo de caso: sistema fotovoltaico comercial conectado à rede**. 2016. 113 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

TORRES, O. F. F. **Fundamentos da Engenharia Econômica e da análise econômica de projetos**. São Paulo: Thomson Learning. 2006. 145 p.

TYAGI, V. V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 1383-1398, 2012.

TYAGI, V. V.; RAHIM, N. A. A.; RAHIM, N. A.; SELVARAJ, J. A. L. Progress in solar PV technology: Research and achievement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 443-461, 2013.

URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; TIEPOLO, G. M. **Acompanhamento do Desempenho do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica do Escritório Verde da UTFPR**. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 9, Florianópolis, 2014a.

URBANETZ JUNIOR, J.; CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; TIEPOLO, G. M. **Análise do desempenho de dois anos de operação do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 5, Recife, 2014b.

VALE, A. M.; FELIX, D. G.; FORTES, M. Z.; BORBA, B. S. M. C.; DIAS, B. H.; SANTELLI, B. S. Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida”. **Energy Policy**, v. 108, p. 292-298, 2017.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. **Revista Gazeta da Física**, v. 29, p. 10-15, 2006.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H. HADDAD, J. NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J. YAMACHITA, R. A. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. Campinas: Elektro, 2012. 314 p.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Érica. 2015. 224 p. ISBN: 978-85-365-1489-5.

YANG, M.; BLYTH, W. Modeling investment risks and uncertainties with real options approach. **International Energy Agency**, v. 23, 2007.

ZHANG, H. L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; CACÈRES, G. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 466-481, 2013.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 208p.

ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA IFPI-FLORIANO

