



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ELITON BEZERRA BARBOSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA DE INVESTIMENTO EM GERADOR
SOLAR FOTOVOLTAICO – UM ESTUDO DE CASO**

**ARARUNA, PB
2018**

ELITON BEZERRA BARBOSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA DE INVESTIMENTO EM GERADOR
SOLAR FOTOVOLTAICO – UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Energias renováveis.

Orientador: Prof. Msc. Eduardo Morais de Medeiros.

**ARARUNA, PB
2018**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B238a Barbosa, Eliton Bezerra.

Análise da viabilidade financeira de investimento em gerador solar fotovoltaico – um estudo de caso [manuscrito] / Eliton Bezerra Barbosa. - 2018.

46 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2018.

"Orientação : Prof. Me. Eduardo Morais de Medeiros , Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Energias Renováveis. 2. Análise de Investimento. 3. Sustentabilidade. I. Título

21. ed. CDD 621.471

ELITON BEZERRA BARBOSA

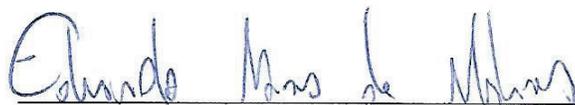
ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA DE INVESTIMENTO EM GERADOR
SOLAR FOTOVOLTAICO – UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual da Paraíba como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Energias renováveis.

Aprovada em: 29/11/2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Msc. Eduardo Moraes de Medeiros (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Msc. Luísa Eduarda Lucena de Medeiros
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Msc. Lavandes Marques de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A Deus, pelo discernimento, saúde e serenidade,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A cada um, sem exceção, que de alguma forma, direta ou indireta, participaram em algum momento desta jornada, duvidando, acreditando, ensinando, compartilhando, participando ou proporcionando, deixando um pouco de si, levando um pouco de mim, minha eterna gratidão!

RESUMO

A energia solar encontra-se em momento diferenciado desde a regulação da Resolução Normativa (REN) 482/2012, que estabeleceu os mecanismos legais para que consumidores possam produzir sua própria energia a partir de fontes renováveis conectadas à rede de distribuição de energia elétrica das concessionárias através de um arcabouço regulamentar que não só dá condições, mas também incentiva através das vantagens que incidem sobre quem passa a aderir a geração distribuída. Neste contexto, a projeção é que a energia solar fotovoltaica continue a crescer exponencialmente, onde em 2017 houve um aumento na potência instalada de 207,40% em relação a 2016, segundo dados do Balanço Energético Nacional (MME, 2018). Um fator determinante para investir em um gerador solar fotovoltaico é a paridade entre o preço convencionalmente pago por energia elétrica à concessionária e o preço pago mensalmente em um financiamento do sistema, no qual ao término do financiamento, o investidor deve passar a ter apenas custos operacionais e de disponibilidade ao produzir sua própria energia por um período de mais 20 anos. Neste sentido, objetivou-se realizar um estudo de caso da viabilidade financeira de investimento em gerador solar fotovoltaico para um empreendimento comercial de médio porte para a região do tipo restaurante e churrascaria localizado na cidade de Passa e Fica/RN, onde foi orçado os custos de implantação do sistema em 4 empresas de engenharia diferentes que atuam na região e calculado através de pagamento à vista e financiado o fluxo de caixa, *payback* simples e descontado, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Os resultados corroboram o cenário atual de pleno crescimento, no qual a economia financeira estimada neste estudo pode chegar até a 91,36% para o empreendimento analisado e o retorno do investimento deve gerar um lucro médio de R\$1.414.727,58 para pagamento à vista e de R\$1.376.823,67 para pagamento via financiamento bancário sob condições de juros simuladas.

Palavras-Chave: Energias Renováveis. Análise de Investimento. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Solar energy is in different time since the regulation of normative resolution (REN) 482/2012, which established the legal mechanisms for consumers to produce their own energy from renewable sources connected to the distribution network of dealers through a regulatory framework that does not only gives conditions, but also encourages through the advantages that affect those who join the distributed generation. In this context, the projection is that the use of solar photovoltaic energy continues to increase exponentially, where in 2017 there was an increase in installed capacity of 207.40% compared to 2016, according to data from the National Energy Balance (MME, 2018). A determining factor for investing in a photovoltaic solar generator is the parity between the price conventionally paid for electric power to the concessionaire and the price paid monthly in a system financing, where, at the end of the financing, the investor must proceed to produce energy by at least less 20 years with only operational and availability costs. In this sense, this work objective was to carry out a case study of the financial feasibility of investing in solar photovoltaic generator for a commercial enterprise located in the city of Passa e Fica / RN, where the costs of implementing the system were budgeted in 4 different companies region and calculated through cash payment and financed cash flow, simple and discounted payback, NPV and IRR. The results support the current scenario of strong growth, where financial savings can reach up to 91.36% for the undertaking under investigation and the return on investment is expected to generate an average income of R\$ 1,414,727.58 for a cash payment and of R\$ 1,376,823.67 for payment through bank financing under simulated interest terms.

Keywords: Renewable energy. Investment analysis. Photovoltaic Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2017.....	15
Figura 2 – Radiação solar incidente média anual no Brasil.....	17
Figura 3 – Curvas corrente-tensão e potência-tensão das células e ponto MPP.....	23
Figura 4 – Curvas corrente-tensão para associações em (a) série e (b) em paralelo.....	24
Figura 5 – Aplicações de inversores de energia solar classificados quanto ao porte.....	25
Figura 6 – Preço médio de geradores fotovoltaicos entre 2013 e 2016 no Brasil.....	28
Figura 7 – Fluxograma das etapas metodológicas do estudo de caso.....	31
Figura 8 – Localização do empreendimento em estudo.....	32
Figura 9 – Irradiação solar diária média para área de estudo.....	33
Figura 10 – Geração estimada média mensal do gerador solar no primeiro ano.....	38
Figura 11 – Fluxo de caixa acumulado dos investimentos com pagamento a vista.....	39
Figura 12 – Fluxo de caixa acumulado dos investimentos com pagamento financiado..	40
Figura 13 – Valor total desembolsado envolvendo energia elétrica em 25 anos.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições padrão de referência para ensaio (STC).....	19
Tabela 2 – Composição dos custos de um gerador solar fotovoltaico entre 5 e 10 KWp.....	28
Tabela 3 – Informações básicas do empreendimento em estudo.....	32
Tabela 4 – Parâmetros de cálculo de receitas e despesas envolvendo o gerador solar.....	35
Tabela 5 – Componentes dimensionados para o gerador solar fotovoltaico em estudo.....	37
Tabela 6 – Preços orçados do gerador solar fotovoltaico em estudo.....	39
Tabela 7 – Caixa acumulado do investidor em 25 anos em relação às quatro empresas.....	41
Tabela 8 – TIR e VPL em 25 anos em relação as quatro empresas.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Filmes de silício amorfo
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Disseleneto de Cobre Índio e Gálio
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CRESESB	Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
c-Si	Silício mono ou multicristalino
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
GFV	Gerador Fotovoltaico
GTM	Green Tech Media
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IFSC	Institui Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOF	Impostos Incidentes sobre a Operação
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LCA	Letra de Crédito do Agronegócio
LCI	Letra de Crédito Imobiliário
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (ponto de máxima potência)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIS	Programa de Integração Social
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
REN	Resolução Normativa

SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (condições padrão de referência)
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima De Atratividade
TUSD	Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição
TUST	Tarifa de Utilização de Serviços de Transmissão
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNIFESP	Universidade Federal de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

AM	Massa de ar
G	Irradiância solar
Wp	Watt pico
PR	<i>Performance ratio</i>
T	Temperatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Cenário e potencial energético brasileiro.....	15
3.2	Concepções da energia solar fotovoltaica.....	18
3.3	Legislação e incentivos à energia solar fotovoltaica no Brasil.....	20
3.4	Componentes de um sistema gerador fotovoltaico.....	22
3.4.1	Módulos fotovoltaicos.....	22
3.4.2	Inversores.....	25
3.4.3	Demais componentes.....	26
3.5	Fatores intervenientes no desempenho do gerador solar fotovoltaico.....	27
3.6	Análise de custos associados a um gerador solar fotovoltaico.....	27
3.6.1	Valor Presente Líquido.....	29
3.6.2	Taxa Interna de Retorno.....	30
3.6.3	<i>Payback</i>	30
4	METODOLOGIA.....	31
4.1	Caracterização da pesquisa.....	31
4.2	Localização do empreendimento em estudo.....	31
4.3	Caracterização do empreendimento em estudo.....	32
4.4	Irradiação incidente local.....	33
4.5	Cálculo da potência do gerador solar fotovoltaico.....	34
4.6	Orçamento do gerador solar fotovoltaico.....	35
4.7	Análise financeira.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1	Dimensionamento do gerador solar fotovoltaico.....	37
5.2	Análise financeira.....	38
5.2.1	Custo de implantação.....	38
5.2.2	Fluxo de caixa.....	39
5.2.3	TIR e VPL.....	42
6	CONCLUSÃO.....	43
7	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia elétrica a baixo custo e de boa qualidade é um fator decisivo para o desenvolvimento econômico e social de um país. Entretanto, a geração de energia pode acarretar em impactos ambientais imensuráveis. Com o compromisso de reduzir a emissão de gases poluentes provenientes da geração de energia, as esferas públicas federais vêm repensando sua matriz, adotando políticas que gradualmente devem majorar a participação de fontes renováveis em substituição às fontes convencionais.

Entre as fontes renováveis em expansão na matriz elétrica brasileira, destaca-se a solar fotovoltaica devido à regulação da geração distribuída no país. O Brasil é particularmente privilegiado para exploração de energia solar fotovoltaica devido à vasta extensão territorial e elevados níveis de radiação solar incidente, superiores aos das nações desenvolvidas (HICKEL, 2017; MONTENEGRO, 2013). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) projeta que o número de unidades consumidoras residenciais e comerciais sob regime da geração distribuída (REN 482/2012) passe de 26.834 em 2017 para 886.700 em 2024, o que representa aumento de mais de 3.000,00% no número de beneficiados em apenas 7 anos (ANEEL, 2017a)

Os investimentos nesta modalidade fundamentam-se principalmente devido à paridade entre o preço mensal pago de energia elétrica à concessionária e o preço mensal pago ao financiar um gerador solar fotovoltaico que, ao término do financiamento, o consumidor deve produzir energia por no mínimo 20 anos a partir de uma fonte limpa e renovável: o sol. Porém, os benefícios de usar a fonte solar fotovoltaica para produzir sua própria energia vão além do retorno financeiro, especialmente para médios e grandes consumidores de energia do tipo pessoa jurídica, devido ao valor e responsabilidade socioambiental que pode ser agregado às empresas.

Qualquer investimento em um gerador solar fotovoltaico passa pelo crivo da análise do retorno financeiro do sistema, pois, embora existam outros benefícios atrelados ao sistema de energia renovável, o tocante monetário é o maior agente propulsor do investimento. Com isso, este trabalho justifica-se pela necessidade de avaliar e quantificar os benefícios financeiros a quem se propõe a produzir sua própria energia através de fonte solar fotovoltaica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar a análise financeira da implantação de um gerador solar fotovoltaico em um empreendimento comercial de médio porte para a região localizado na cidade de Passa e Fica, Rio Grande do Norte.

2.2 Objetivos específicos

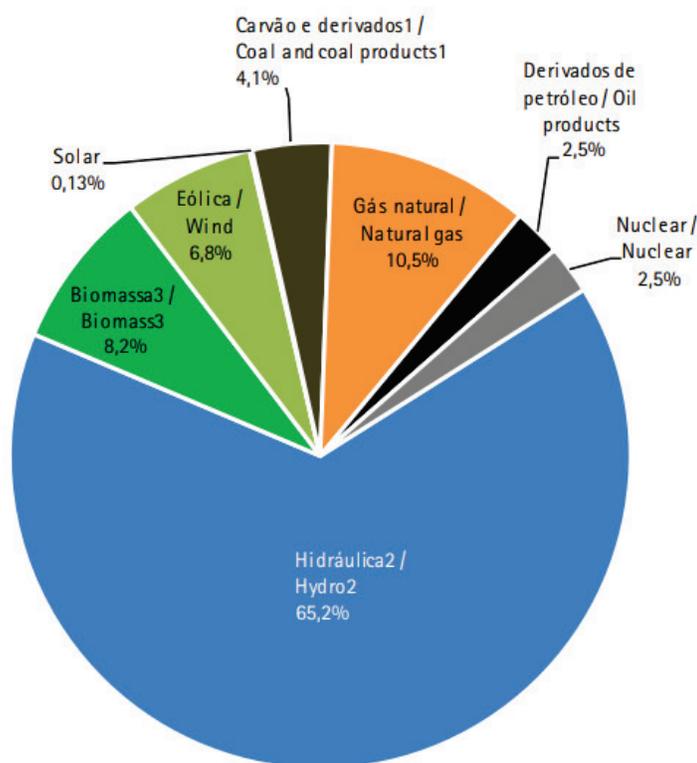
- Dimensionar um gerador solar fotovoltaico para o empreendimento em estudo;
- Orçar em quatro empresas de engenharia diferentes que atuam na região os custos de implantação do gerador solar fotovoltaico dimensionado;
- Calcular o fluxo de caixa acumulado para investimento a vista e financiado, *payback* simples e descontado do investimento, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL);
- Comparar os custos com e sem energia solar no horizonte de 25 anos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cenário e potencial energético brasileiro

A infraestrutura energética brasileira tem gerações de energia na forma centralizada como principais fontes da matriz elétrica, predominando a geração hidrelétrica, onde o local de instalação dos geradores fica limitado a disponibilidade dos recursos naturais, o que resulta em longas linhas de transmissão devido à distância geográfica entre geração e consumo. Em 2017 a fonte hidrelétrica representava 65,2% da oferta interna de energia elétrica nacional, enquanto as fontes de energia renováveis solar fotovoltaica, eólica e biomassa, juntas, representavam pouco mais de 15% da matriz (Figura 1).

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2017



Fonte: MME (2018)

O sistema elétrico brasileiro, composto principalmente por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição, é conectado entre si através do Sistema Interligado Nacional (SIN), onde somente 1,7% do total da demanda de energia elétrica brasileira não está conectada ao SIN. Os sistemas isolados ao SIN devem-se principalmente às dificuldades físicas e econômicas

de interligação da rede elétrica em áreas remotas. O principal benefício desta integração através do SIN é a possibilidade de troca de energia elétrica entre regiões, fundamental em um país dependente de usinas hidrelétricas localizadas em áreas com regimes hidrológicos diferentes (PEREIRA *et al.*, 2017; ANEEL, 2008).

Entretanto, Lacchini (2017) cita dois importantes impactos negativos consequentes deste modelo operacional que utiliza grandes artérias radiais de linhas de transmissão: primeiro, as perdas por transmissão, que afetam diretamente a eficiência do sistema, e segundo, o fluxo da energia, em condições extremas, podendo chegar a níveis de saturação, que têm o efeito de provocar interrupções, às vezes em cascata, afetando vastas regiões.

Embora o potencial hidrelétrico seja abundante no país, a complexidade de implementar novas usinas geradoras para aumentar a capacidade produtiva aliada a crises hídricas prolongadas no país geram uma tendência de declínio da participação hidrelétrica na matriz elétrica, devendo ter representatividade gradualmente minimizada devido ao crescimento de outras fontes convencionais ou renováveis. De 2011 a 2015 a participação das hidrelétricas na matriz brasileira recuou de 81,8% para 65%, enquanto a produção das térmicas convencionais e a gás natural avançou de 8,4% para 23% no mesmo período para suprir a lacuna das hidrelétricas (GUARNIERI, 2017; ANEEL, 2008).

Na iminência de diversificar as fontes de energia da matriz brasileira, reduzir gases poluentes, investir em fontes limpas e reduzir as perdas do sistema, surge em crescimento exponencial a geração próxima ou junta ao ponto de consumo, isto é, a geração distribuída, embora sua potência instalada ainda seja pouco significativa para a matriz nacional.

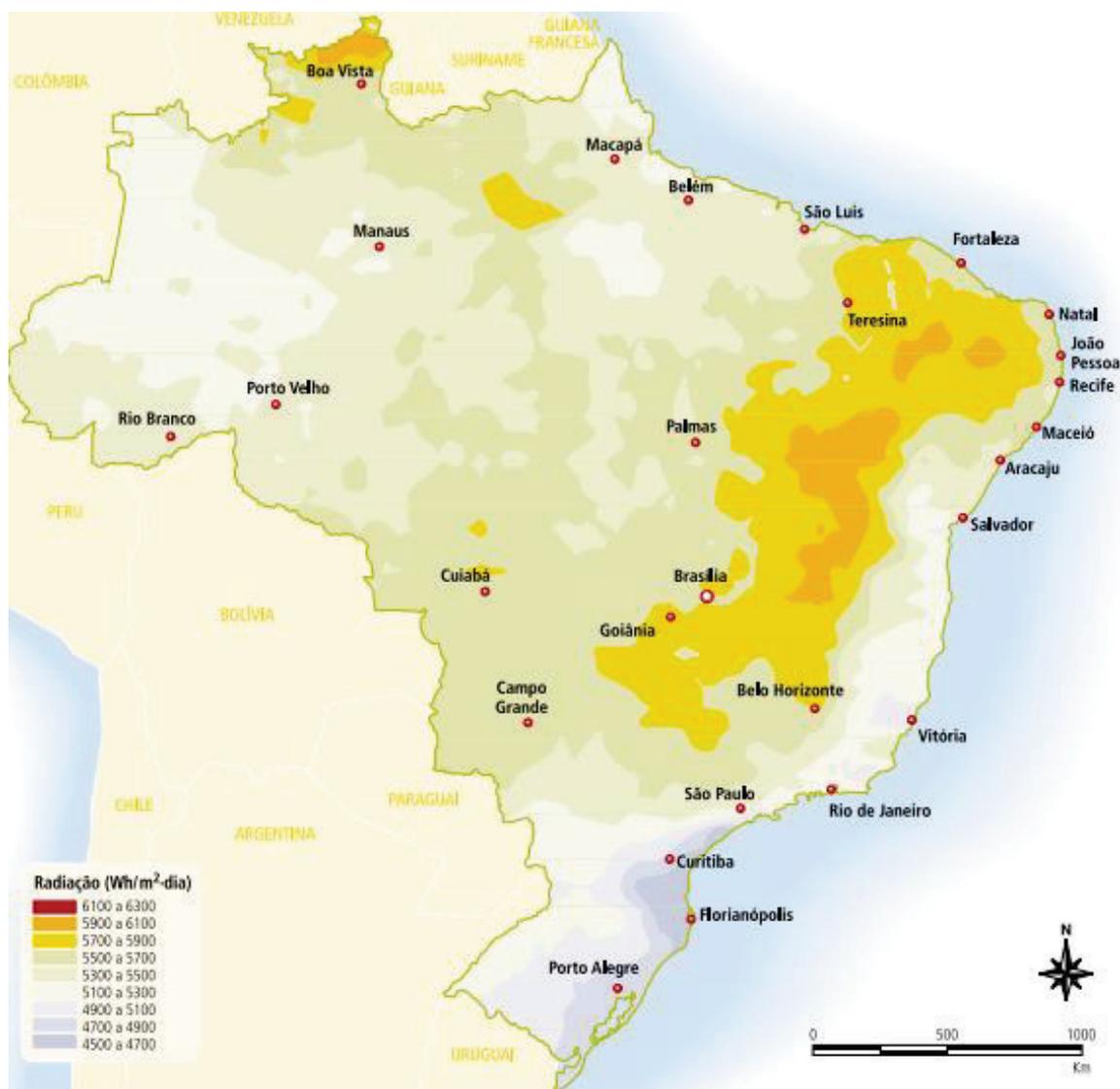
A ANEEL afirma que o incentivo à geração distribuída é justificado pelos potenciais benefícios ao setor elétrico, como: o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2018).

De 2014 para 2016 foi multiplicada por 17,5 vezes a quantidade de instalações de geração distribuída solar fotovoltaica. No ano de 2016, a quantidade de geradores distribuídos fotovoltaicos aumentou de 1.686 para 7.458 unidades sob o regime da REN 482/2012, o que corresponde a um crescimento de 342% (RAMOS *et al.*, 2018; ANEEL, 2017). Dados do Balanço Energético Nacional (MME, 2018) mostram que em 2017 a geração distribuída no Brasil atingiu 359,15 GWh de geração, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, que atingiu 165,87 GWh de geração, o que representa um aumento de 207,40% em relação a 2016 e de 730% em relação a 2015.

Este crescimento acompanha o cenário mundial, no qual a taxa anual de crescimento consolidado de energia solar fotovoltaica foi de 47% no período de 2009 a 2015, representando um aumento de 10 vezes neste intervalo de tempo (IEA, 2016).

A exploração de energia solar fotovoltaica no Brasil justifica-se pelo seu potencial produtivo resultante da radiação solar incidente, em especial no semiárido nordestino, que possui os maiores índices do país, sendo possível se beneficiar da energia solar em incontáveis aplicações para mitigar situações de escassez e vulnerabilidade características daquela região (Figura 2).

Figura 2 – Radiação solar incidente média anual no Brasil



Fonte: ANEEL (2008)

Guarnieri (2017) afirma que a inserção da tecnologia solar fotovoltaica na economia brasileira tende a gerar novas oportunidades de emprego nos setores industriais e de serviços, além de possibilitar outros benefícios, como o arrendamento de terras para a instalação dos novos parques solares por parte dos pequenos agricultores, prática que pode ser importante para a economia no sertão nordestino.

Para o Greenpeace (2016), a perspectiva de crescimento de empregos no segmento fotovoltaico brasileiro é de 2.804.215 vagas diretas e indiretas até 2030 somente no segmento de geração distribuída. Em um cenário mais otimista, com a inclusão de mais incentivos através da inserção de políticas públicas, a exemplo da liberação do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), isenção de impostos, como o Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), o Greenpeace (2016) projeta ainda que o número de postos de trabalhos até 2030 chegaria próximo dos quatro milhões somente no mercado de geração distribuída, dos quais 2.037.939 representariam empregos diretos gerados.

Com os avanços tecnológicos, estima-se que os custos de capital inicial para sistemas fotovoltaicos decresçam em mais de 75% até 2060. Como resultado, projeta-se que a capacidade total instalada fotovoltaica alcance 1.011 GW em 2030 e ultrapasse 4.000 GW até 2060, representando 4% e 12% da geração total de energia no mundo, respectivamente (WEC, 2016).

3.2 Concepções da energia solar fotovoltaica

A energia elétrica produzida a partir da incidência de radiação solar em módulos fotovoltaicos é denominada energia solar fotovoltaica. Advinda de uma fonte limpa, Rüther (2004) apresenta como principais características da energia solar fotovoltaica a sua propriedade modular, podendo ser dimensionada numa ampla faixa de potência instalada, e, por ser um sistema estático, possui baixa taxa de manutenção aliado a um alto grau de confiabilidade.

A tecnologia está fundamentada no efeito fotovoltaico demonstrado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839, quando observou que duas placas de platina imersas em solução ácida iluminadas pela luz solar geravam eletricidade (LACCHINI, 2017). A conversão de energia solar em energia elétrica acontece nas células fotovoltaicas, constituídas fundamentalmente por três camadas: camada tipo N, camada tipo P e junção PN. A camada tipo N é dopada negativamente, enquanto a camada tipo P é dopada positivamente. Quando expostas à radiação solar, gera-se uma tensão nas células fotovoltaicas entre as camadas tipo N e P que

estão separadas pela camada isolante PN. Desta forma, o fluxo de elétrons entre as camadas tipo P e N ocorre através de um condutor elétrico, o que resulta no aproveitamento da energia elétrica resultante do efeito fotovoltaico.

Segundo Lacchini (2017), existem atualmente várias tecnologias para a conversão da energia radiante em energia elétrica, como: lâminas de silício mono ou multicristalino (c-Si), de filmes de silício amorfo (a-Si), de telureto de cádmio (CdTe) e de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS). Entretanto, a tecnologia de silício é predominante na produção mundial de células fotovoltaicas, com quase 94% da produção total de células em 2016, principalmente através do silício do tipo multicristalino que representou 68% da produção (MINTS, 2016).

A irradiância solar que incide em uma superfície é composta por suas componentes direta e difusa. A irradiância direta é a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera, enquanto a componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as direções após sofrer espalhamento na atmosfera terrestre (PEREIRA *et al.*, 2017; CRESESB, 2014).

Guarnieri (2017) afirma que pelo fato de as grandezas determinantes na produção de um gerador solar fotovoltaico variarem ao longo do dia em um mesmo local, e principalmente de região para região, fez-se uma padronização necessária para comparar sistemas fotovoltaicos. Esta padronização é denominada de STC (do inglês: *standard test conditions*) ou condições padrão de referência para ensaio, que são as condições utilizadas em laboratórios de teste que definem os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos (Tabela 1)

Tabela 1 – Condições padrão de referência para ensaio (STC)

Grandeza	Valor STC	Unidade
Irradiância (G)	1.000	W/m ²
Massa de ar (AM)	1,5	Adimensional
Temperatura (T)	25	°C

Fonte: Guarnieri (2017)

Desta forma, embora as características elétricas dos módulos fotovoltaicos sejam variáveis em função das condições as quais estão submetidos, seu *datasheet* (ficha de dados característicos), que descreve seu comportamento elétrico, deve ser produzido sob as mesmas condições para qualquer módulo, de acordo com a padronização STC que fixa os valores de Irradiância, Massa de ar e Temperatura.

A energia produzida por um módulo fotovoltaico é diretamente proporcional à irradiação incidente sobre ele. Contudo, nem toda irradiação absorvida pelo módulo é convertida em energia. Esta irradiação não convertida resulta em perdas do sistema, como acontece por exemplo através das perdas térmicas ou por reflexão (HICKEL, 2017).

A energia gerada e a temperatura do módulo fotovoltaico são inversamente proporcionais. O cenário ideal para o maior aproveitamento solar são dias frios, com pouca massa de ar e muita irradiação. Contudo, este cenário trata-se de uma idealização, pois, na prática, irradiação e temperatura são grandezas físicas diretamente proporcionais, visto que a temperatura ambiente aumenta proporcionalmente à radiação incidente na superfície.

3.3 Legislação e incentivos à energia solar fotovoltaica no Brasil

O setor elétrico brasileiro é regulado pela ANEEL, que objetiva assegurar ao consumidor energia elétrica de qualidade a um preço justo e, ao mesmo tempo, garantir à distribuidora retorno financeiro pelos serviços prestados através de concessão. A estrutura tarifária brasileira normatizada pela ANEEL divide os consumidores em dois principais grupos: grupo A, cobrados tanto pela demanda quanto pelo consumo de energia; e grupo B, cobrados somente pela energia consumida (PINTO, 2018; ANEEL, 2008).

Além da demanda e do consumo de energia, o preço final é composto dos encargos, que tem aplicações específicas no setor, como pesquisa, desenvolvimento, reservas energéticas e renumeração, e dos tributos, que são pagamentos compulsórios ao Poder Público com a finalidade de garantir que o Governo desenvolva suas atividades políticas (ANEEL, 2008).

Devido ao modelo operacional dependente das hidrelétricas, somente em 2014 as tarifas de energia elétrica aumentaram 17%, impulsionadas pela crise hídrica no país (DIEESE, 2015). Este aumento deve-se ao implemento de fontes mais caras de energia para suprir as demandas energéticas que estão além da capacidade de geração, sendo normalmente já contratadas pelas distribuidoras a título de disponibilidade, onde são repassados seus custos ao consumidor final. Soma-se ainda neste período o incremento mensal das bandeiras tarifárias normatizadas pela REN 547/2013, passando a incidir acréscimo nas tarifas de energia em função da disponibilidade de geração (PINTO, 2018; GUARNIERI, 2017).

Incentivados pelo viés financeiro devido ao alto valor gasto com energia elétrica mensalmente, inflação e bandeiras tarifárias, combinado ainda ao viés sustentável em produzir energia elétrica a partir de uma fonte renovável, investimentos descentralizados em energia solar fotovoltaica começaram a destacar-se em residências, comércios e indústrias. Destes, o

fator econômico é o maior agente, pois os consumidores dificilmente diferenciam a origem da energia elétrica, mas sim o preço pago por ela, sendo a similitude entre o preço mensal gasto com energia e o preço mensal pago pelo financiamento do sistema gerador solar um fator determinante, visto que após o término do financiamento o consumidor passará a produzir sua própria energia a baixo custo.

O Brasil apresenta um arcabouço regulatório que propicia o estabelecimento e crescimento da fonte solar fotovoltaica no país tanto no segmento de geração distribuída, quanto de geração centralizada (RAMOS *et al.*, 2018). O instrumento chave para o crescimento brasileiro em geração distribuída foi a aprovação da resolução normativa REN 482/2012 pela ANEEL, que estabeleceu as condições gerais para acesso à rede de distribuição de energia elétrica de unidades consumidoras que produzem sua própria energia a partir de fontes renováveis.

A REN 482/2012 divide a geração distribuída em micro e minigeração, tal que:

“I – microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.” (ANEEL, 2012, p.1).

Em 2015 a REN 687/2015 complementou a legislação brasileira de geração distribuída, alterando a REN 482/2012 com o implemento das diretrizes do sistema de compensação de energia elétrica, onde foi acrescentado:

“III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;” (ANEEL, 2015, p.1).

O sistema de compensação permitiu ao consumidor injetar o excesso de energia elétrica produzido por micro ou minigeração na rede de distribuição da concessionária local, gerando créditos, sem custo algum, que podem ser utilizados em até 60 meses, inclusive em outras unidades consumidoras do mesmo titular, pessoa física ou jurídica, dentro de uma mesma área de concessão.

Igualmente importante às resoluções REN 482/2012 e REN 687/2015 foi o PRODSIT, regulado pela ANEEL, que teve adicionado ao seu escopo o procedimento de acesso à rede básica de distribuição por meio de micro e minigeração distribuída, visando garantir a padronização, qualidade, segurança e celeridade no processo (RAMOS *et al.*, 2018). Neste cenário, o PRODIST garantiu a desburocratização do processo de homologação de um gerador solar fotovoltaico, impedindo o tratamento discriminatório por parte das distribuidoras de energia.

A partir das resoluções da ANEEL o incentivo à micro e minigeração distribuída aumentou através de programas, créditos e facilidades, citados por Veríssimo (2017), como o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), estimulando a geração de energia por parte dos consumidores utilizando fontes renováveis, como a energia solar; isenção de IPI; isenção de ICMS (em alguns estados); chamadas públicas da ANEEL; desconto na tarifa de uso do sistema de transmissão/distribuição (TUST/TUSD); redução de imposto de importação; inclusão no programa Mais Alimentos 1; apoio do BNDES e outros bancos financiadores.

Os incentivos para a geração distribuída, conforme discutido acima, têm sido essenciais para a maior adoção da energia fotovoltaica por parte da população brasileira, na medida em que a viabilidade econômica da instalação dos sistemas – do ponto de vista do consumidor – fica cada vez mais atraente (RAMOS *et al.*, 2018).

3.4 Componentes de um sistema gerador fotovoltaico

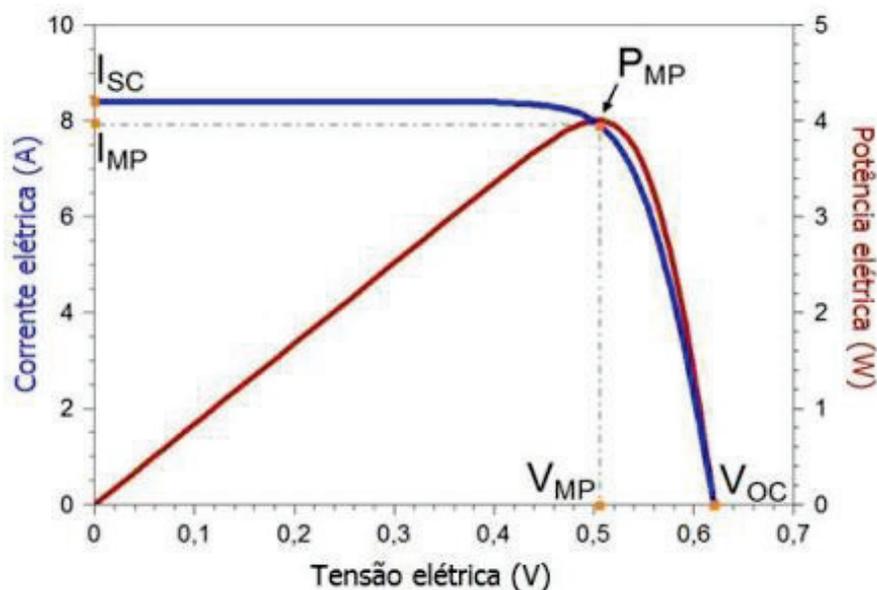
Um sistema gerador solar é composto fundamentalmente por módulos fotovoltaicos interligados em série e/ou paralelo; inversores, que convertem corrente contínua (CC) produzida pelos módulos em corrente alternada (CA); estruturas de fixação dos módulos, geralmente de alumínio ou aço galvanizado; quadros de proteção, denominados *string* box, que contém os dispositivos elétricos de proteção; e cabeamento.

3.4.1 Módulos fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico é o componente elementar que constitui a unidade produtiva do sistema, onde ocorre a conversão direta da luz solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico em um conjunto de células conectadas em série e paralelo (CRESESB, 2014). As

características elétricas das células podem ser visualizadas através de sua curva corrente-tensão, que é determinada em ensaios de laboratórios sob condições padrão de teste (STC) (Figura 3).

Figura 3 – Curvas corrente-tensão e potência-tensão das células e ponto MPP



Fonte: CRESESB (2014)

Embora cada módulo possua seus valores elétricos característicos, o comportamento das curvas, de uma forma geral, deve ser similar para qualquer célula fotovoltaica, tal que, quando uma célula submetida a condições padrão de teste (STC) tem os dois terminais desconectados e conseqüentemente o circuito aberto, o fluxo de corrente deve ser nulo e a tensão na célula deve ser máxima, denominada tensão de circuito aberto (V_{oc}). Quando o circuito estiver fechado, deve ocorrer o fluxo de corrente e, conseqüentemente, a diminuição da tensão na célula fotovoltaica. A máxima corrente da célula, denominada corrente de curto-circuito (I_{sc}), ocorre quando a tensão na célula é nula.

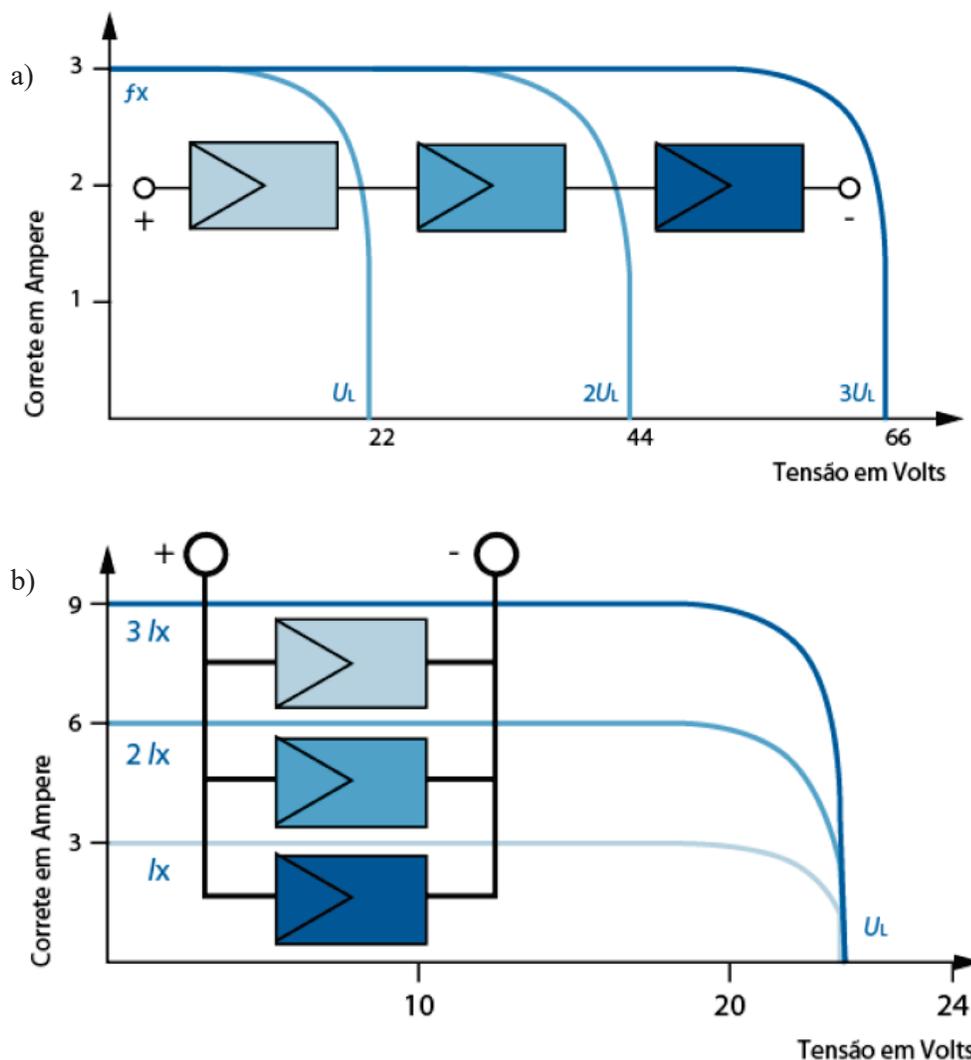
No ensaio, uma fonte de tensão realiza uma varredura sobre o módulo, variando tensões desde valores negativos até a tensão de circuito aberto. Durante a varredura são registrados os pares de dados correspondentes de corrente e tensão, permitindo descrever a curva característica da célula, e, conseqüentemente, do módulo fotovoltaico (CRESESB, 2014).

Lacchini (2017) afirma que o ponto de inflexão da curva característica corrente-tensão corresponde ao ponto no qual o produto de tensão e corrente atinge o seu valor máximo P_{MP} (ou MPP, do inglês *maximum power point*), isto é, a máxima potência nominal do módulo,

sendo este o ponto de trabalho do inversor para conseguir extrair a máxima produção de energia do módulo fotovoltaico.

Um arranjo fotovoltaico de dois ou mais módulos interligados em série é denominado de *string*. Da concepção elétrica, em uma *string*, o terminal positivo de um módulo é conectado ao terminal negativo do módulo subsequente. Se os módulos são idênticos e encontram-se sob as mesmas condições de irradiância e temperatura, as correntes elétricas individuais são iguais e a tensão da *string* é a soma da tensão individual de cada módulo. Quando os terminais positivos de duas ou mais *strings* são interligados entre si, assim como os terminais negativos, tem-se uma associação em paralelo. Neste caso, a corrente elétrica do sistema é resultado da soma das correntes das *strings*, enquanto a tensão entre as *strings* é a mesma (Figura 4).

Figura 4 – Curvas corrente-tensão para associações (a) em série e (b) em paralelo



Fonte: próprio autor (2018)

Os arranjos fotovoltaicos devem ser associados em série e paralelo para atingir níveis de tensão e corrente adequados aos limites máximos e mínimos dos inversores em que estarão conectados. A potência nominal do sistema gerador é definida a partir da soma de todas as potências de seus módulos fotovoltaicos, tal que, a capacidade de produção de energia cresce proporcionalmente à quantidade de módulos instalados.

3.4.2 Inversores

Os inversores solares são equipamentos eletrônicos responsáveis por inverter a corrente contínua (CC) advinda dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), e podem ser classificados em três categorias quanto ao uso:

- *grid-tie*, que são inversores conectados à rede elétrica da distribuidora;
- *off-grid*, que são inversores isolados da rede elétrica da distribuidora;
- inversores híbridos, que podem atuar de forma isolada da rede elétrica ou não.

Caso o inversor conecte-se à rede elétrica da distribuidora, a tensão de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico semelhante à fornecida pela concessionária de energia. Dependendo do porte do gerador solar fotovoltaico, os inversores solares podem ser divididos fundamentalmente em 3 grupos, cada qual com suas aplicações (Figura 5).

Figura 5 – Aplicações de inversores de energia solar fotovoltaica classificados quanto ao porte

INVERSOR CENTRALIZADO	INVERSOR <i>STRING</i>	MICROINVERSOR
<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado em parques solares de megaprodução; • Várias <i>strings</i> se conectam ao mesmo equipamento, gerando elevadas tensões e correntes; • Apresenta como principal vantagem o custo benefício com cabeamento devido à grande quantidade de módulos fotovoltaicos que consitem o sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado em geração distribuída; • Alguns módulos fotovoltaicos conectam-se ao equipamento a partir de <i>strings</i>, associadas em paralelo ou não; • Apresenta como principal vantagem o custo de aquisição quando comparado à microinversores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado em pequenas gerações; • Geralmente no máximo dois módulos fotovoltaicos se conectam ao equipamento; • Apresenta como principal vantagem a possibilidade de manutenção sem comprometer a geração, visto que pode-se isolar apenas o equipamento falho do restante do sistema.

Fonte: próprio autor (2018)

A Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE, 2012) afirma que o processo produtivo de inversores para aplicações fotovoltaicas tem grande sinergia com a produção de equipamentos eletroeletrônicos para aplicações na área de informática, telecomunicações e geração de energia, e por este motivo, o número destes equipamentos fabricados no Brasil cresce conforme a inserção da tecnologia no país. O desafio do mercado nacional é produzir equipamentos que sejam competitivos comparativamente – e principalmente – aos produtos asiáticos.

Quanto à manutenção dos inversores, Lacchini (2017) afirma que a vida útil, coerentemente com todos os dispositivos eletrônicos, sofre limitação de produtividade devido às falhas ligadas ao envelhecimento ou operação em condições de estresse, devendo variar entre 10 e 15 anos.

3.4.3 Demais componentes

Além de módulos fotovoltaicos e inversores, constituem um gerador solar fotovoltaico as estruturas de fixação, os dispositivos de proteção, os condutores e seus respectivos conectores. Os condutores devem possuir resistência a temperaturas extremas, resistência a raios ultravioletas, ao ozônio e a água, resistência mecânica à abrasões, cortes e rasgos de capa protetora, o que lhes configuram características diferentes dos condutores convencionais residenciais. Já os conectores devem ter isolamento para máxima tensão do sistema e ser capazes de suportar intempéries, visto que estarão expostos ao ambiente (CRESESB, 2014).

Os dispositivos de proteção ficam posicionados em quadros de proteção denominados *string box*, sendo seus principais componentes: fusível fotovoltaico, que tem a função de proteger as *strings* do fluxo de corrente reversa de um conjunto em série com tensão maior para um com tensão menor, devendo ser posicionado na saída de cada *string* em ambas polaridades (positiva e negativa); dispositivo de proteção contra surtos (DPS), que objetiva desviar a alta corrente proveniente de um surto através do aterramento; disjuntores, que devem proteger o sistema em caso de correntes elevadas causadas por curto-circuito, sobrecarga ou falha no aterramento; e chaves seccionadoras, que permitem interromper o fluxo de corrente em situações de emergência ou manutenção (CRESESB, 2014).

Por fim, as estruturas de fixação, geralmente de alumínio ou aço galvanizado, devem ser dimensionadas para suportar o peso próprio do sistemas e cargas acidentais, como esforços de vento e de manutenção.

3.5 Fatores intervenientes no desempenho do gerador solar fotovoltaico

O desempenho de um arranjo fotovoltaico é determinado principalmente pela irradiância incidente (G) e massa de ar (AM), que variam entre latitude, longitude, altitude, horário e estação do ano, e pela *performance ratio* (PR), comumente chamada de perdas, que é uma medida de grandeza dada em percentual utilizada para estipular um fator de qualidade do sistema, tal que quanto mais próximo de 100% o valor, mais eficaz é o gerador. O cálculo da *performance ratio* é dada pela relação entre o Rendimento real do sistema indicado em KWh num intervalo de tempo e o Rendimento nominal do sistema calculado em KWh no mesmo intervalo de tempo (SMA, 2018).

São fatores determinantes na *performance ratio* de um sistema: temperatura dos módulos fotovoltaicos, onde quanto maior for a temperatura, maiores serão as perdas do sistema através de energia térmica; sombras e sujeiras, que interferem diretamente na captação de irradiação solar das células fotovoltaicas; rendimento de módulos e inversores, que determina a eficiência do componente no sistema; transmissão, gerando perdas através de condutores, especialmente em longas distâncias ou com conexões mal executadas que provocam pontos de fuga de corrente; degradação das células fotovoltaicas, que diminuem a eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica (SMA, 2018).

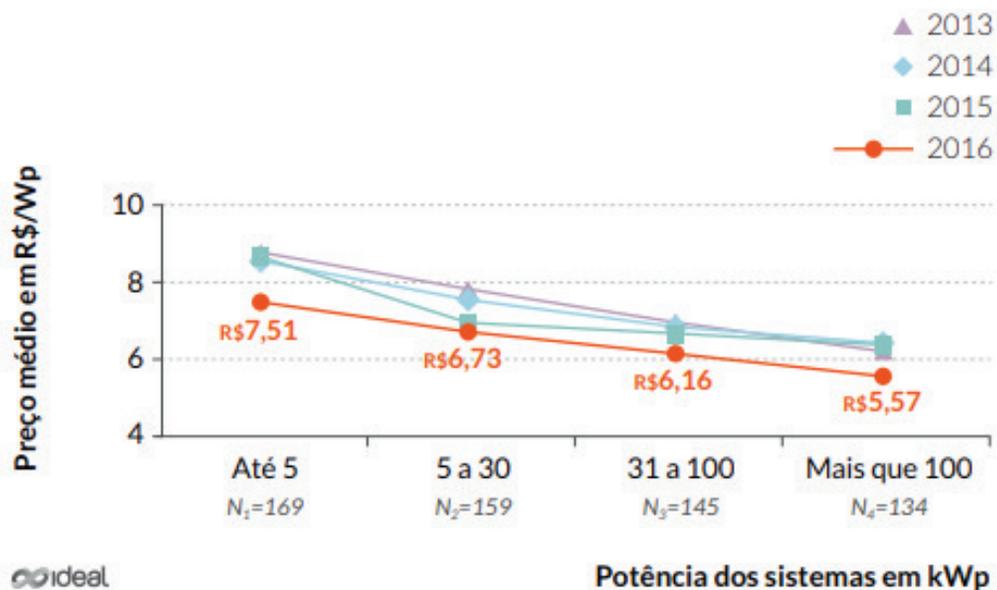
3.6 Análise de custos associados a um gerador solar fotovoltaico

Lacchini (2017) afirma que:

“os preços dos sistemas fotovoltaicos e os custos da energia produzida dependem de diferentes aspectos, tanto econômicos, quanto de capacidade tecnológica, dificuldade de instalação, modalidade de exposição, contratos de fornecimento, diferenças climáticas, entraves burocráticos, entre outros” (LACCHINI, 2017, p.53).

Em pesquisa realizada pelo Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (IDEAL, 2017), em 2014 o valor médio para sistemas de até 5 KWp no Brasil foi de R\$ 8,81/Wp, enquanto em 2016 o valor médio reduziu para R\$ 7,51/Wp o que mostra o declínio no custo de implantação de geradores a medida que aumenta a consolidação da tecnologia com o passar dos anos. Para os sistemas de maior potência, o valor pago por Wp tende a reduzir proporcionalmente à potência instalada, chegando ao preço médio de R\$ 5,57/Wp para sistemas de mais de 100 KWp de potência instalada (Figura 6).

Figura 6 – Preço médio de geradores fotovoltaicos entre 2013 e 2016 no Brasil



Fonte: IDEAL (2017)

Um estudo da Green Tech Media (GTMRESEARCH, 2015) com o mercado americano no ano de 2015 mapeou os principais custos associados a aquisição de um gerador solar fotovoltaico entre 5 e 10 KWp (Tabela 2).

Tabela 2 – Composição dos custos de um gerador solar fotovoltaico entre 5 e 10 KWp

Custo	Percentual (%)
Cadeia de suprimentos + despesas + lucro	41,0
Módulo fotovoltaico	21,7
Trabalho direto	10,7
Inversor	8,7
Projeto + Engenharia + Homologação	7,2
Despesas diversas com estruturas	5,5
Despesas diversas com elétrica	5,2

Fonte: adaptado de Gtmresearch (2015)

A implantação de um gerador solar fotovoltaico para geração distribuída passa pelo crivo financeiro, onde uma avaliação econômica deve estimar o fluxo de caixa ao longo do tempo. A engenharia econômica tem a função de formular, estimar e avaliar em situações

futuras o que se deve ocorrer com elementos financeiros envolvidos em tomadas de decisões, como fluxo de caixa, tempo de ocorrência e taxa de juros (BLANK, 2008).

Investimentos em energia solar fotovoltaica crescem sustentados pela expectativa do retorno financeiro ao usuário que passa a produzir sua própria energia. Dávi (2015) afirma que o tempo de retorno financeiro é um dos requisitos mais importantes para o investimento de um sistema fotovoltaico, levando-se em consideração a lucratividade na produção de energia e a vida útil que o sistema poderá atingir em longo prazo.

3.6.1 Valor presente líquido

O método do Valor Presente Líquido (VPL) consiste em avaliar se determinada alternativa de investimento em valores equivalentes à data inicial apresenta lucro ou prejuízo a uma determinada taxa de juros. Este método caracteriza-se fundamentalmente pela transferência de todo fluxo de caixa para o instante presente, descontada a taxa de juros, como mostrado na equação 1 (NOGUEIRA, 2011; TORRES, 2004).

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Onde FC_t é o fluxo de caixa no instante de tempo t e i é a taxa de juros incidente.

Em qualquer investimento, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) estabelece o valor parâmetro dos juros para a avaliação de viabilidade econômica, ou seja, a taxa de juros que resulta no valor mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando se faz um investimento. Nogueira (2011) afirma que a definição da TMA não é um processo trivial, visto que seu valor depende de diferentes aspectos, como disponibilidade de recursos, custo dos recursos, taxa de juros paga no mercado para o montante envolvido, previsibilidade do fluxo, horizonte de planejamento do projeto, oportunidades estratégicas, etc.

Quando o cálculo do VPL envolvendo receitas e despesas resulta em um valor negativo, significa que o investimento gera valores aquém da expectativa definida pela TMA. De forma análoga, VPL com valores positivos gera resultados além da expectativa definida pela TMA. Por fim, VPL nulo gera os valores definidos pela TMA, o que já torna o investimento rentável (NOGUEIRA, 2011).

3.6.2 Taxa interna de retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) possibilita uma análise de investimento por meio de sua rentabilidade, onde a TIR é a taxa de juros que torna o valor presente dos recebimentos igual ao valor presente dos desembolsos de um fluxo de caixa. Em termos práticos, quando for calculada a TIR de determinado investimento e/ou financiamento, está sendo extraído dele o percentual ganho que ele oferece ao investidor (NOGUEIRA, 2011; TORRES, 2004) (Equação 2).

$$\sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} = 0; i = TIR \quad (2)$$

Onde FC_t é o fluxo de caixa no instante de tempo t e i é a Taxa Interna de Retorno.

3.6.3 Payback

O *payback* simples avalia o tempo de recuperação do capital investido, sendo viável o investimento quando o *payback* está dentro do prazo estabelecido pelo investidor para recuperar seu investimento. Para tornar mais precisa a informação de recuperação do capital investido, o método *payback* descontado considera em seus cálculos o valor temporal do dinheiro, isto é, considera o fluxo de caixa no valor presente a partir de uma taxa de juros (NOGUEIRA, 2011; CAMARGO, 1998).

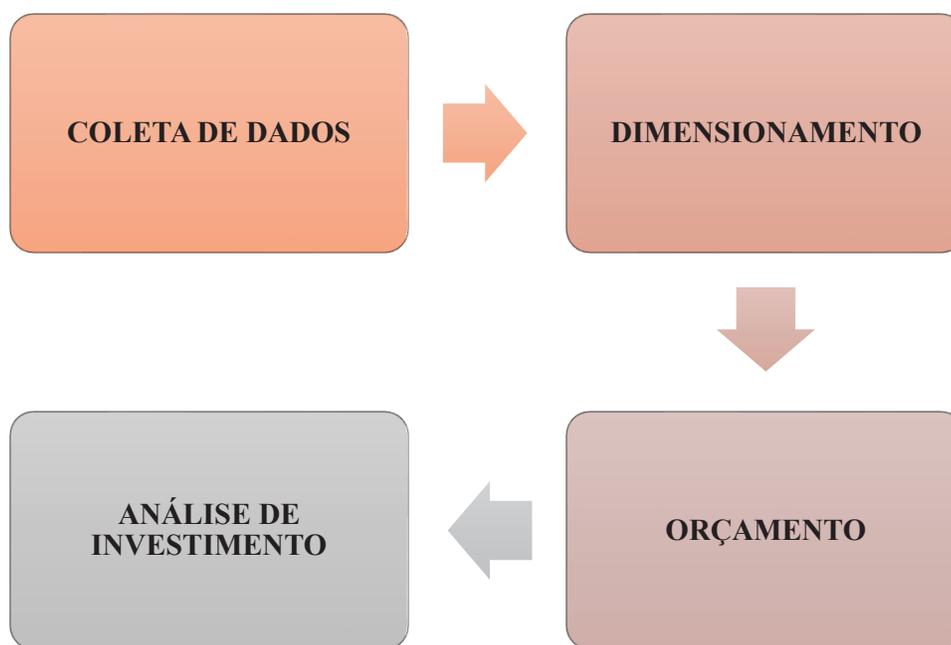
4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização da pesquisa

A presente pesquisa trata-se de um estudo de caso realizado em um empreendimento comercial de médio porte para a região do tipo restaurante e churrascaria. A pesquisa caracteriza-se como um diagnóstico aprofundado de uma situação específica com o objetivo de entender sua realidade tal que seja possível corrigir, melhorar e reproduzir sua aplicabilidade em demais casos semelhantes.

Neste contexto, o estudo de caso dividiu-se em quatro etapas metodológicas principais: coleta de dados, processamento dos dados, quantificação e análise (Figura 7).

Figura 7 – Fluxograma das etapas metodológicas do estudo de caso

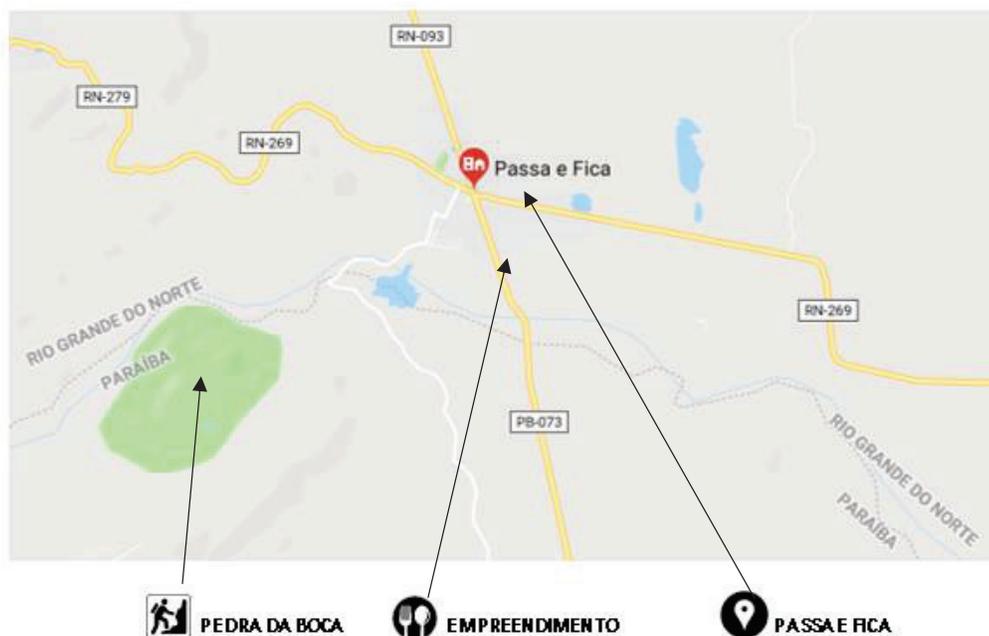


Fonte: próprio autor (2018)

4.2 Localização do empreendimento em estudo

O empreendimento localiza-se na zona rural da Cidade de Passa e Fica, Rio Grande do Norte, com coordenadas geográficas 06°26'09,6" de latitude sul e 35°38'34,8" de longitude oeste, inserido na microrregião do Agreste Potiguar e com clima do tipo quente e semiárido, com temperatura média anual de 25,6°C (MME, 2005) (Figura 8).

Figura 8 – Localização do empreendimento em estudo



Fonte: próprio autor (2018)

O empreendimento é impulsionado pelo setor turístico da região devido à sua proximidade com o Parque Estadual Pedra da Boca e Santuário Nossa Senhora de Fátima, que estão distantes aproximadamente 5 Km e localizados na cidade de Araruna, Paraíba.

4.3 Caracterização do empreendimento em estudo

Para o dimensionamento do sistema gerador solar fotovoltaico, com objetivo de suprir as demandas de energia elétrica média atual do empreendimento em estudo, foi coletado as informações básicas relevantes ao cálculo (Tabela 3)

Tabela 3 – Informações básicas do empreendimento em estudo

Informação	Resultado
Tipo de conexão	Trifásica
Consumo anual de energia	25.014,0 KWh
Tarifa incidente de energia elétrica	R\$ 0,85/KWh
Inclinação do telhado	15°
Orientação do telhado	Leste / Oeste

Fonte: próprio autor (2018)

Os dados de inclinação e orientação do telhado foram aferidos *in loco* e são importantes parâmetros na estimativa da *performance ratio* do sistema, visto que para a latitude em que está localizado o empreendimento, a máxima geração de energia ocorre quando os módulos estão orientados para o Norte geográfico. Quanto ao espaço físico, a área total de telhado disponível é de 300m², sem interferências de sombreamento, que o torna apto a receber aproximadamente 150 módulos fotovoltaicos, viabilizando o projeto.

Os dados de tipo de conexão, consumo anual de energia e tarifa incidente constam na conta mensal de energia elétrica. O tipo de conexão é necessário para determinar o custo de disponibilidade, que é o consumo mínimo cobrado pela concessionária, tal que conexões monofásicas, bifásicas e trifásicas tem custos de disponibilidade de, respectivamente, 30 KWh, 50 KWh e 100 KWh. Já o consumo anual de energia estima a demanda do empreendimento para os próximos anos, sendo o valor parâmetro para o dimensionamento. Por fim, a tarifa incidente determina o valor cobrado pelo consumo, servindo de referência para as análises financeiras.

4.4 Irradiação incidente local

Para estimar a irradiação incidente na área em estudo, utilizou-se os valores do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017), tal que o valor médio diário no plano horizontal é de 5,48 KWh/m²/dia (Figura 9).

Figura 9 – Irradiação solar diária média para área de estudo



Fonte: CRESESB (2018)

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017), que é resultado de um trabalho cooperativo entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pesquisadores de diversas instituições, como Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), e pode ser acessado através do programa *SunData* do Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB, 2018), o mês de novembro é o período de maior média diária de irradiação (6,06K Wh/m²/dia) na área em estudo, enquanto o mês de junho possui a menor média diária (4,52 KWh/m²/dia), sendo, respectivamente, os meses esperados de maior e menor geração de energia elétrica.

4.5 Cálculo da potência do gerador solar fotovoltaico

Para o dimensionamento da potência do gerador solar fotovoltaico (P_{GFV}), levou-se em consideração a demanda anual de energia elétrica no empreendimento, a irradiação incidente local, a radiação luminosa STC, a demanda de disponibilidade anual de acordo com o tipo de conexão do empreendimento e a *performance ratio* do sistema (Equação 3).

$$P_{GFV} = \frac{(D_a - D_{ma}) * G_{STC}}{G * PR} \quad (3)$$

Onde D_a é a demanda anual em KWh, D_{ma} é a demanda de disponibilidade anual em KWh, G_{STC} é a radiação luminosa em condições padrão de referência em W/m², G é a irradiação média anual no plano horizontal em KWh/m²/ano e PR é a *performance ratio*.

Por se tratar de um empreendimento com conexão trifásica, a demanda de disponibilidade anual utilizada no cálculo foi de 1200 KWh, visto que o valor normatizado pela ANEEL é de 100 KWh por mês.

Já a *performance ratio*, devido à dificuldade de estimar isoladamente algumas perdas, teve seu valor fixado neste estudo, tomando como referência outros dimensionamentos já realizados na região com porte semelhante ao da pesquisa.

A quantidade N de módulos fotovoltaicos necessários para satisfazer a geração de energia elétrica é determinada a partir da potência do módulo ($P_{módulo}$) utilizado e da potência do gerador solar fotovoltaico (P_{GFV}) calculado para suprir a demanda anual de energia (Equação 4).

$$N = \frac{P_{GFV}}{P_{módulo}} \quad (4)$$

Optou-se neste dimensionamento por módulos de potência de 335 W, que é usualmente comercializado no mercado solar atual do país.

4.6 Orçamento do gerador solar fotovoltaico

Os custos de implantação do gerador solar fotovoltaico dimensionado foram orçados em quatro empresas de engenharia diferentes que atuam na região, estando incluso no orçamento todos os custos referentes ao serviço e aos equipamentos, sendo solicitado em todas as empresas de engenharia que o orçamento siga as configurações tanto quanto possível do gerador dimensionado, sem explicitar marca ou fabricante dos componentes.

Os quatro orçamentos foram submetidos à simulação de financiamento em banco indicado pelo empreendimento em estudo, cujo pessoa jurídica possui conta e relacionamento, sendo a taxa de juros de 1,08% ao mês para financiamento do valor integral do gerador solar fotovoltaico em 60 parcelas mensais fixas, acrescido de taxa de cadastro e Impostos Incidentes sobre a Operação (IOF).

4.7 Análise financeira

A partir dos valores orçados nas diferentes empresas de engenharia, calculou-se VPL, TIR, fluxo de caixa simples e acumulado, *payback* simples e descontado, e valor total gasto com e sem energia solar, estimando-se os parâmetros envolvidos no cálculo (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros de cálculo de receitas e despesas envolvendo o gerador solar

Informação	Resultado
Perda de eficiência	0,70% ao ano
Custo anual de operação	1% ao ano do custo do gerador
Custo de troca de equipamentos	10% do custo do gerador
Tempo necessário para troca dos equipamentos	14 anos
Inflação energética anual	8% ao ano

Fonte: próprio autor (2018)

Considerou-se para análise o intervalo de tempo de 25 anos, que corresponde ao tempo de garantia dos módulos fotovoltaicos, onde o fluxo de caixa foi determinado a partir da estimativa de todas as despesas (compra do gerador, manutenção, custo operacional, depreciação, inflação, compra de energia da concessionária quando o gerador não suprir a demanda) e receitas (compensação de energia elétrica e lucro resultante do montante que seria gasto com a concessionária comprando integralmente toda energia elétrica) associadas ao gerador solar fotovoltaico.

Os custos anuais de operação englobam os valores de manutenção básica, como limpeza periódica e testes de comissionamento, projetando serem realizados uma vez ao ano para garantir a máxima produção possível. Já a manutenção com troca de equipamentos foi estimada ocorrer com 14 anos com custo de 10% do valor inicial do gerador, condizente com as projeções de Lacchini (2017). Já perda de eficiência anual deve diminuir a capacidade de geração do sistema, sendo considerado neste estudo o valor de 0,70% ao ano, que é condizente com o valor de eficiência dado como garantia pelos fornecedores de módulos fotovoltaicos que é de 80% até o 25º ano, e é um importante parâmetro para garantir um equilíbrio no dimensionamento do sistema de modo que não fique subdimensionado pela perda de rendimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dimensionamento do gerador solar fotovoltaico

A partir das informações básicas do empreendimento em estudo, foi dimensionado um gerador solar fotovoltaico de 18,09 KWp para suprir 100% de sua demanda de energia elétrica anual. Ao optar por módulos fotovoltaicos de 335 W, devem ser necessários 54 módulos para atingir a potência dimensionada.

Frente a impossibilidade de comercialmente encontrar um inversor com exatos 18,09 KWp de potência, pode-se optar por superdimensionar ou subdimensionar o equipamento, respeitando os limites máximos e mínimos de tensão de circuito aberto, tensão de operação, corrente e potência do gerador dimensionado. Neste estudo optou-se por 1 inversor superdimensionado de 20 KWp, o que garante uma eventual futura possibilidade de aumentar a potência do sistema acrescentando-se mais módulos fotovoltaicos.

O arranjo fotovoltaico não foi explicitado, visto que para determinar as associações em série e paralelo dos módulos seria necessário fixar as características elétricas do inversor, e conseqüentemente sua marca. Desta forma, também não foi especificado a quantidade de dispositivos de proteção contidos nos *string box* CC e CA, pois estes dependem do arranjo fotovoltaico.

Frente ao exposto, foi dimensionado os componentes básicos do gerador solar fotovoltaico para satisfazer a demanda do empreendimento (Tabela 5).

Tabela 5 – Componentes dimensionados para o gerador solar fotovoltaico em estudo

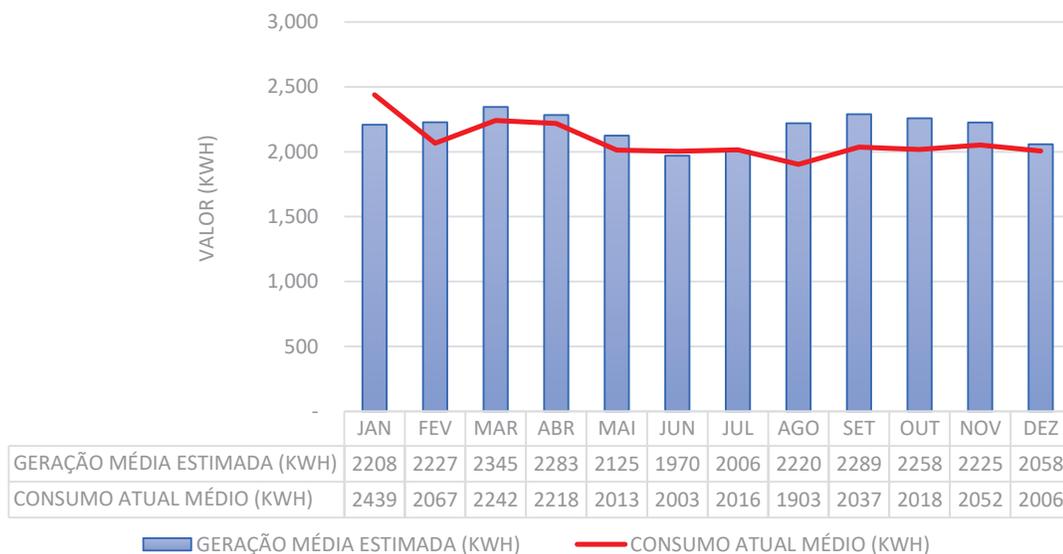
Componente	Quantidade
Módulo fotovoltaico polly 335 W	54
Inversor 20 KW	1
String Box CA	1
String Box CC	1

Fonte: próprio autor (2018)

Com a potência instalada de 18,09 KWp, a radiação média local consultada no *SunData* do CRESESB de 5,48 KWh/m²/dia e a *performance ratio* definida em 0,744, estima-se que o gerador solar fotovoltaico produza em média 2.185,0 KWh por mês, sendo o mês de março de

maior produção estimada com 2.345,2 KWh e o mês de junho de menor produção com 1.970,0 KWh (Figura 10).

Figura 10 – Geração estimada média mensal do gerador solar no primeiro ano



Fonte: próprio autor (2018)

Vê-se a necessidade – e importância – do sistema de compensação para o equilíbrio entre geração e consumo devido à sazonalidade de produção e demanda. O valor anual acumulado de geração estimada é de 26.216,0 KWh no primeiro ano de funcionamento do sistema, enquanto a demanda anual é de 25.014,0 KWh, resultando em 1.202,0 KWh de créditos junto à concessionária, que deverão ser utilizados nos anos subsequentes à medida que o sistema diminui sua eficiência e, conseqüentemente, sua capacidade de geração.

5.2 Análise financeira

5.2.1 Custo de implantação

Os custos de implantação do gerador solar fotovoltaico orçados em 4 empresas diferentes de engenharia que atuam na região resultou em um valor médio para o sistema de R\$97.014,63 (Tabela 6).

Tabela 6 – Preços orçados do gerador solar fotovoltaico em estudo

Empresa	Valor	Valor por potência instalada
A	R\$105.502,80	R\$5,83/Wp
B	R\$95.915,33	R\$5,30/Wp
C	R\$95.990,39	R\$5,30/Wp
D	R\$90.650,00	R\$5,01/Wp

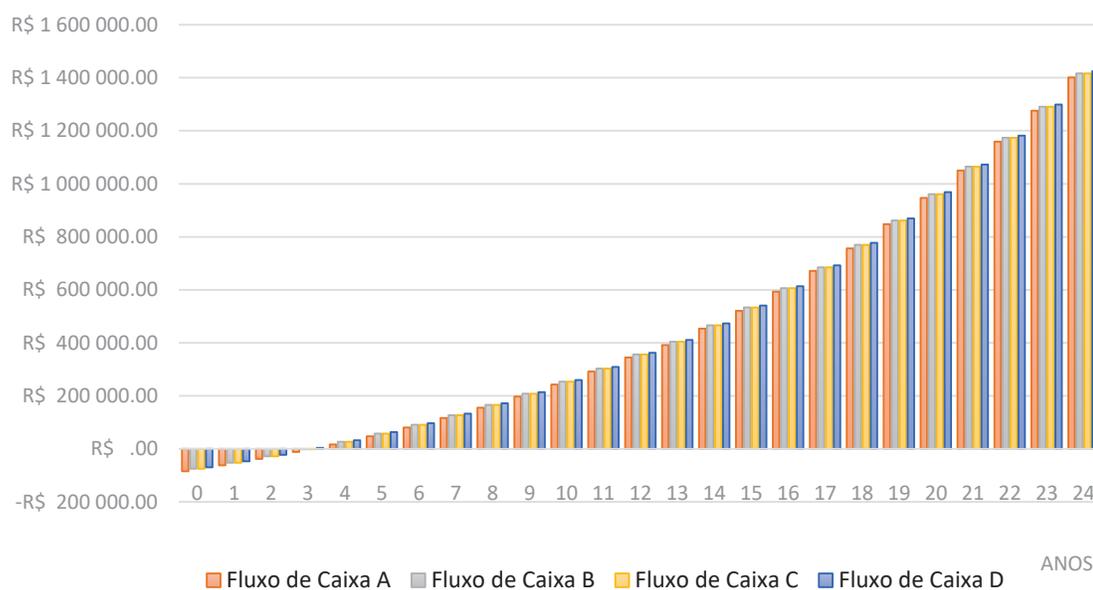
Fonte: próprio autor (2018)

O preço médio por potência instalada para o presente estudo foi de R\$5,36/Wp, estando abaixo do valor médio para sistemas entre 5 e 30 KWp aplicado no Brasil no ano de 2016, que era de R\$6,73/Wp, conforme consta nos estudos do IDEAL (2017), o que corrobora a tendência natural de decaimento do preço, e, conseqüentemente, do custo benefício, à medida que a tecnologia ganha mercado e amadurece no país.

5.2.2 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa acumulado para pagamento à vista resulta em *payback* simples médio de 3 anos e 8,5 meses para o investimento, sendo: 4 anos para a empresa A; 3 anos e 8 meses para as empresas B e C; e 3 anos e 6 meses para a empresa D. (Figura 11).

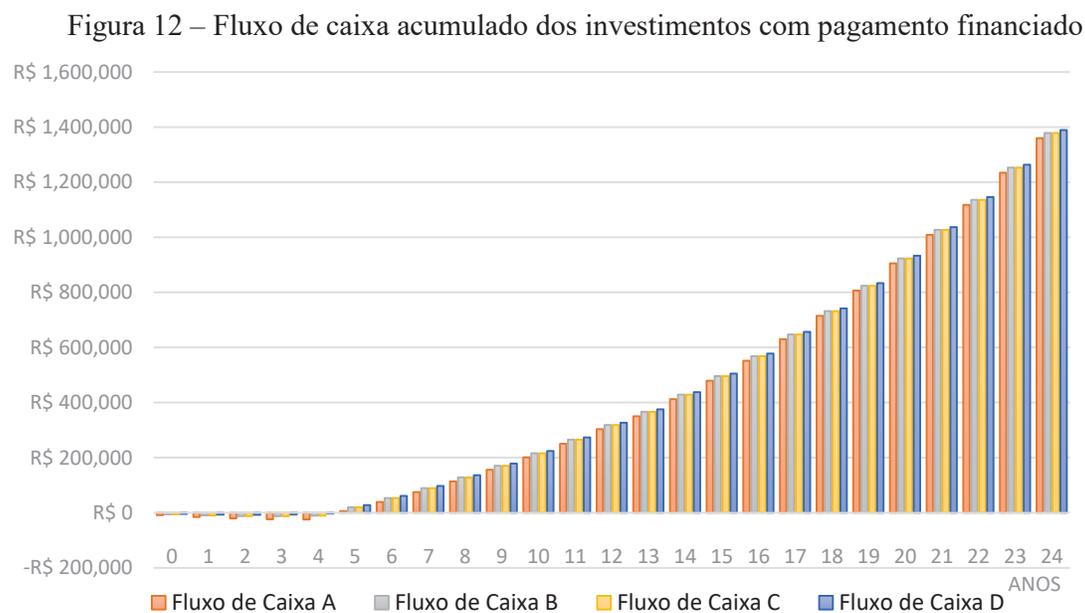
Figura 11 – Fluxo de caixa acumulado dos investimentos com pagamento à vista



Fonte: próprio autor (2018)

Já para o *payback* descontado, o valor médio é de 4 anos e 5,5 meses, sendo: 4 anos e 10 meses para a empresa A; 4 anos e 5 meses para as empresas B e C; e 4 anos e 2 meses para a empresa D.

No caso de pagamento através de financiamento, de acordo com o banco e condições simuladas, o valor médio das parcelas é de R\$2.268,21 pagos em 60 meses, enquanto o atual valor da conta de energia é de R\$1.771,83. Desta forma, o investidor deve possuir inicialmente um fluxo de caixa acumulado com valores negativos, visto que o desembolso das parcelas mensais em um primeiro momento é maior que o valor pago por energia elétrica ao comprar da concessionária. No entanto, antes do término do financiamento, o investidor já deve começar a lucrar devido ao aumento da tarifa energética devido à inflação, enquanto as parcelas do financiamento se mantêm constantes (Figura 12)



Fonte: próprio autor (2018)

Ao término do financiamento, em 5 anos, os custos mensais de energia elétrica se resumem ao custo operacional do sistema e custo de disponibilidade da concessionária, que devem representar inicialmente em média apenas 4,19% do valor que seria pago à concessionária ao comprar energia elétrica. Logo, os demais 95,81% passam a ser lucro para o investidor.

O caixa acumulado ao fim dos 25 anos deve ser em média de R\$1.414.727,58 para pagamento à vista, e de R\$1.376.823,67 para pagamento através de financiamento sob as condições de juros simuladas (Tabela 7).

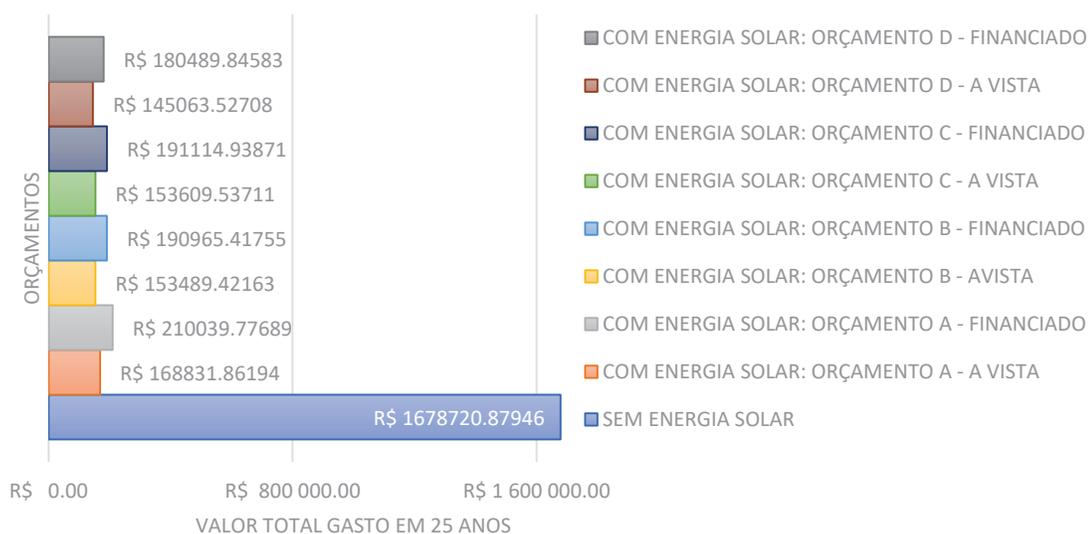
Tabela 7 – Caixa acumulado do investidor em 25 anos em relação as quatro empresas

Empresa	Pagamento à vista	Pagamento a prazo
A	R\$1.401.144,30	R\$1.359.936,39
B	R\$1.416.486,74	R\$1.379.010,75
C	R\$1.416,366,63	R\$1.378.861,23
D	R\$1.424.912,64	R\$1.389.486,32

Fonte: próprio autor (2018)

Caso o empreendimento opte por continuar a comprar energia elétrica da concessionária, o valor total desembolsado nos próximos 25 anos deve ser de R\$1.678.720,88, enquanto no melhor cenário, para investimento com pagamento à vista através da empresa D, que apresenta o menor custo de implantação, o valor total desembolsado nos próximos 25 anos envolvendo todos os custos acerca de energia elétrica deve ser de R\$145.063,53, o que resulta em uma economia de R\$1.533.657,35, ou seja, 91,36% (Figura 13).

Figura 13 – Valor total desembolsado envolvendo energia elétrica em 25 anos



Fonte: próprio autor (2018)

5.2.3 TIR e VPL

Por fim, considerando o pagamento à vista, o TIR médio foi de 37,74%, enquanto o VPL médio foi R\$391.163,60 (Tabela 8).

Tabela 8 – TIR e VPL em 25 anos em relação as quatro empresas

Empresa	TIR	VPL
A	34,43%	R\$ 381.673,21
B	38,06%	R\$ 392.565,51
C	38,02%	R\$ 392.480,24
D	40,46%	R\$ 398.547,44

Fonte: próprio autor (2018)

Nogueira (2011) afirma que quando o VPL apresenta valor maior ou igual a zero, o investimento já se torna rentável. No estudo de caso do gerador solar fotovoltaico, considerando um fluxo de caixa de 25 anos, o VPL pode atingir até R\$398.547,44, que é 4,03 vezes maior que o valor inicial desembolsado, corroborando a rentabilidade do investimento.

6 CONCLUSÃO

A análise financeira corrobora o retorno do investimento em um gerador solar fotovoltaico para o estudo de caso analisado, que, entre os cenários projetados, pode gerar uma economia de até de R\$1.533.657,35 durante a vida útil estimada de 25 anos do sistema, a qual representa 91,36% do valor que seria desembolsado comprando energia da concessionária.

Caso opte pelo pagamento à vista, o investimento deve possuir *payback* simples médio de 3 anos e 8,5 meses, devendo-se ter pelo menos mais 21 anos e 3,5 meses de lucratividade sobre o sistema. Se o pagamento ocorrer através de financiamento bancário, o investidor deve começar a lucrar sobre o sistema a partir do 4º ano, que seria o momento em que, devido à inflação energética, o valor desembolsado ao comprar energia elétrica seria maior que a própria parcela do financiamento. Ao término do financiamento, em 5 anos, os lucros sobre o investimento devem crescer exponencialmente, visto que as despesas reduzirão significativamente.

Entre os motivos propulsores de investimento em um gerador solar fotovoltaico, o ganho financeiro é a principal causa, sendo comprovado aqui o retorno do investimento ao longo da vida útil do sistema. Além do lucro financeiro, é importante ressaltar os ganhos socioambientais, uma vez que se produz e consome uma energia renovável e sustentável, que gera impactos mínimos ao meio ambiente, principalmente quando comparado com a geração de energia por fontes não renováveis.

Com o exposto, futuros trabalhos podem dar continuidade ao presente estudo de caso realizado, comparando quantitativamente os valores de receitas e despesas entre energia solar fotovoltaica e outras fontes de investimento, como poupança bancária, tesouro direto, fundos de investimentos DI, previdência privada, Letra de Crédito Imobiliário (LCI), Letra de Crédito do Agronegócio (LCA) ou empresas privadas, criando parâmetros de comparação da rentabilidade do investimento frente às demais formas de aplicação de capital.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Geração Distribuída**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 26 nov. 2018.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. Brasília: ANEEL, 2017a.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 3**. 7 ed. Brasília: ANEEL, 2017b.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **REN 482/2012: Resolução normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília: ANEEL, 2012.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **REN 687/2015: Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Brasília: ANEEL, 2015.
- ANTONIOLLI, A. F. G. **Avaliação do desempenho de geradores solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil**. 2015. 153 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE). **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2018.
- BLANK, L. T. **Engenharia econômica**. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.
- CAMARGO, I. **Noções básicas de engenharia econômica aplicações ao setor elétrico**. Brasília: Finatec, 1998.
- Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual_de_engenharia_fv_2014.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.
- Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB). **SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 26 nov. 2018.
- DÁVI, G. A. **Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR)**. 2013. 174 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (DIEESE). **Comportamento das tarifas de energia elétrica no Brasil**. 2015. Disponível em:

<<https://www.dieese.org.br/notatecnica/2015/notaTec147eletricidade.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

Greenpeace. **Alvorada: Como o incentivo à energia solar fotovoltaica pode transformar o Brasil.** 2016. Disponível em: <https://storage.googleapis.com/planet4-brasil-stateless/2018/07/Relatorio_Alvorada_Greenpeace_Brasil.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

GTMRESEARCH. **U.S. SOLAR MARKET INSIGHT.** 2015. Disponível em: <https://www.seia.org/sites/default/files/resources/Y3pV3Vn7QKQ12015SMI_0.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

GUARNIERI, M. V. **Usinas solares fotovoltaicas com seguimento em um eixo no Brasil: aspectos da construção, custos e expectativa de desempenho.** 2017. 180 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

HICKEL, B. M. **O impacto no desempenho de sistemas fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira sobre os módulos FV – metodologia e avaliação através de curvas IxV em campo.** 2017. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (IDEAL). **O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica.** 2017. Disponível em: <http://ahkbusiness.de/fileadmin/ahk_business_br/05_Publicacoes-Publikationen/Estudo_Fotovoltaico_2017/estudoFV2017_web__1_.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

International Energy Agency (IEA). **TRENDS 2015 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS.** 2015. Disponível em: <http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/IEA-PVPS_-_Trends_2015_-_MedRes.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

LACCHINI, C. **Análise econômica de sistemas fotovoltaicos residenciais no contexto brasileiro, com foco nos indicadores financeiros e nas tarifas locais de energia elétrica.** 2017. 156 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

Ministério de Minas e Energia (MME). Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018.** Rio de Janeiro: EPE, 2018.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Passa e Fica.** 2005. Disponível em: <[rel_passa_e_fica.pdf](#)>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MINTS, P. **Solar PV Market Research.** 2016. Disponível em: <http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/workshop/5-Bonna_Newman_on_behalf_of_Paula_Mints_-_Market_Trends_in_the_US.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

MONTENEGRO, A. A. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil.** Florianópolis 2013. 175 p.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

NOGUEIRA, E. **Introdução à Engenharia Econômica**. São Carlos: Ufscar, 2011.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017.

PINTO, G. X. A. **Impactos da geração solar fotovoltaica e da modalidade de contratação da energia elétrica sobre as despesas com energia elétrica em campus universitário**. 2018. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

RAMOS, C. et al. **Cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Brasília: SEBRAE, 2018. 362 p.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: UFSC, 2004.

SMA (Org.). **Performance Ratio: Factor de qualidade para o sistema fotovoltaico**. Disponível em: <<http://files.sma.de/dl/7680/Perfratio-TI-pt-11.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

TORRES, R. **Matemática financeira e engenharia econômica: a teoria e a prática**. 2004. 87 p. TCC (Graduação) - Curso de Matemática, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

VERÍSSIMO, P. H. A. **Avaliação de uma usina solar fotovoltaica comparando diferentes topologias de sistemas de fixação utilizando duas diferentes tecnologias fv**. 2017. 89 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

VIEIRA, C. S. **Simulação de gerador solar fotovoltaico integrado à edificação e conectado à rede elétrica para suprir a demanda energética do Aeroporto Internacional Tancredo Neves - um estudo de caso**. 2010. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

World Energy Council (WEC). **World Energy Scenarios 2016**. 2016. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016_Full-Report.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.