



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAROLINE CARVALHO FONTÃO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA ESTAÇÃO JUSCELINO KUBITSCHEK EM FORTALEZA**

FORTALEZA
2020

CAROLINE CARVALHO FONTÃO

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA ESTAÇÃO JUSCELINO KUBITSCHEK EM FORTALEZA

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientador: Eng. Breno Bezerra Freitas

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F761e Fontão, Caroline Carvalho.
Estudo de viabilidade de um sistema de geração distribuída fotovoltaica na estação Juscelino Kubitschek em Fortaleza / Caroline Carvalho Fontão. – 2020.
68 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
1. Geração Fotovoltaica. 2. Geração Distribuída. 3. Viabilidade Financeira. 4. Dimensionamento FV. I.
Título.

CDD 621.3

CAROLINE CARVALHO FONTÃO

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA ESTAÇÃO JUSCELINO KUBITSCHEK EM FORTALEZA

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Coorientador: Eng. Breno Bezerra Freitas

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Breno Bezerra Freitas (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Adrielly Maria Mendonça de Paiva Sousa
ANIMA Projetos Engenharia e Comércio LTDA

A Deus.

A minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar força para superar cada obstáculo que já me deparei.

Agradeço a minha mãe, Roseli, por estar do meu lado em todas as dificuldades e ter acreditado em mim quando nem eu acreditava. A minha irmã, Camila, por sempre estar presente mostrando compreensão e companheirismo.

Ao orientador Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho e ao coorientador Eng. Breno Bezerra Freitas, pela excelente orientação, contribuições ao trabalho e o valioso tempo cedidos por eles a este projeto.

Aos amigos que fiz durante a graduação, Danielle, Adrielly, Murilo e Watson, que vivenciaram comigo todos os momentos difíceis e desafiadores. As minhas grandes amigas que fiz durante meu intercâmbio acadêmico, Giovana, Diary e Maria.

Agradeço também as minhas amigas, Isabelle, Gabriela e Bianca que me acompanham desde o ensino médio e sempre estiveram ao meu lado.

Por fim, agradeço ao METROFOR, que me ofereceu a melhor experiência nos 2 anos de estágio e disponibilizou todo o material para que este trabalho fosse possível.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.” (Charles Chaplin)

RESUMO

Muitas empresas atualmente, na busca da minimização de gastos e redução de custos energéticos, encontram na geração solar fotovoltaica (FV) um investimento muito atraente. Empresas de transportes, como o Metrofor, que apresentam diversas áreas disponíveis distribuídas ao longo de uma região, podem fazer proveito de um sistema de geração distribuída (GD) FV instalada em uma estação, no desconto da conta de energia da mesma ou em demais unidades registradas pela mesma titularidade. Assim sendo, o presente trabalho realiza o estudo da viabilidade técnica e financeira da geração de energia elétrica por módulos FV na estação Juscelino Kubitschek da linha Sul, em Fortaleza, Ceará. Por meio do *software SketchUp*, é inicialmente realizada a modelagem 3D da estação, delimitando a área livre na cobertura e em seguida a área livre de sombreamento disponível para a implantação do sistema. Após a representação gráfica concretizada, é realizado o dimensionamento de um sistema de geração de 93 kWp, composto por 372 painéis FV de potência unitária 250W e 15 inversores de potência máxima de 6500W. De posse de todos os valores, é feita a análise financeira por meio do *software RETScreen*, sendo determinada, então, o valor R\$ 318.060,00 de investimento inicial, uma taxa de retorno simples, ou *payback*, de 6,8 anos e retorno do capital próprio de 5,3 anos, além da redução da emissão de 11,7 tCO₂ por ano. A eficiência da metodologia usada é então comprovada, atestando a viabilidade do projeto.

Palavras-chave: Geração Fotovoltaica. Geração Distribuída. Viabilidade Financeira. Dimensionamento FV.

ABSTRACT

Many companies nowadays, in search of minimizing expenses and reduce energy costs, find photovoltaic solar generation a very attractive investment. Transport companies, such as METROFOR, which have several available areas distributed throughout a region, can take advantage of a distributed photovoltaic generation system installed in a station, at a discount on its own energy bill or other units registered by the same owner. Therefore, the present work studies the technical and financial feasibility of the generation of electric energy by photovoltaic modules at the Juscelino Kubitschek station on the Sul line, in Fortaleza, Ceará. Using the *SketchUp* software, the 3D modeling of the station is initially carried out, delimiting the free area on the roof and then the shading-free area available for the implementation of the system. After the graphic representation has been completed, a 93 kWp generation system is designed, consisting of 372 panels with 250W each and 15 inverters with 6500W of maximum power. With all the values, the financial analysis is made using the *RETScreen* software, and then the amount of R\$ 318,060.00 of initial investment is determined, a simple rate of return, or payback, of 6.8 years and return on equity of 5.3 years, in addition to the reduction in emissions of 11.7 tCO₂ per year. The efficiency of the methodology used is then proven, attesting to the project's viability.

Keywords: Photovoltaic Generation. Distributed Generation. Financial Viability. FV Sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de Geração Distribuída de Energia	16
Figura 2 - Modelo de Geração Distribuída Fotovoltaica.....	18
Figura 3 - Crescimento da Geração Distribuída desde a Resolução Normativa de 2012.....	19
Figura 4 - Dinâmica das alterações da Consulta Pública de 2019.....	20
Figura 5 - Projeção do crescimento da potência FV instalada anualmente	21
Figura 6 - Custos da geração de energia proveniente das fontes solar FV e eólica no mundo.	21
Figura 7- Evolução da GD no Brasil 2007-2019 (kW)	22
Figura 8 - Capacidade instalada de GD por fonte no Brasil em setembro de 2019.....	23
Figura 9 - Ranking Estadual da Potência Instalada em GDFV no Brasil em 2020	23
Figura 10 - Terminal Coney Island-Sitwell	27
Figura 11 - Prédio da companhia DMRC com instalação de módulos FV no teto	28
Figura 12 - Estação Guariroba – Metrô do DF	29
Figura 13 - Estação Samambaia Sul	29
Figura 14 - Mapa da Linha Sul do METROFOR com destaque à estação JK	30
Figura 15 - Estação JK vista de cima.	32
Figura 16 - Modelagem da Estação JK no <i>SketchUp</i>	32
Figura 17 - Vista Frontal das plataformas da Estação JK no <i>SketchUp</i>	33
Figura 18 - Estação JK vista de cima no <i>SketchUp</i>	33
Figura 19 - Vista das torres dos elevadores no <i>SketchUp</i>	34
Figura 20 - Vista externa da estação JK.	34
Figura 21 - Comparativo da Estação e sua simulação no <i>SketchUp</i>	36
Figura 22 - Modelagem de uma árvore solar na Faculdade de Tecnologia da UNB.....	37
Figura 23 - Enquadramento da Estação em sua posição real no <i>SketchUp</i>	38
Figura 24 - Estudo do sombreamento da estação – 21 de junho	39
Figura 25 - Estudo do sombreamento da estação – 21 de dezembro.....	41
Figura 26 - Identificação das sombras na cobertura da estação pelo <i>SketchUp</i>	43
Figura 27 - Delimitação da área sombreada no <i>SketchUp</i>	44
Figura 28 - Locais de fixação e recomendação de instalação do Manual de Instalação de Estruturas para Painéis Fotovoltaicos da IBRAP.....	44
Figura 29 - Delimitação da área disponível no <i>SketchUp</i>	45
Figura 30 - Painel Escolhido – Aba de seleção do módulo no <i>RETScreen</i>	48
Figura 31 - Dimensões do módulo da Yingli Solar de modelo YL250P-29b.....	49

Figura 32 - Vista superior da estação - <i>SketchUp</i>	53
Figura 33 - Vista lateral da estação - <i>SketchUp</i>	54
Figura 34 - Informações iniciais da estação - <i>RETScreen</i>	55
Figura 35 - Dados climáticos obtidos - <i>RETScreen</i>	56
Figura 36 - Dados iniciais fornecidos sobre o sistema FV - <i>RETScreen</i>	57
Figura 37 - Configuração das tecnologias utilizadas - <i>RETScreen</i>	57
Figura 38 - Custo de sistemas FV por faixa de potência	58
Figura 39 - Análise de Custos - <i>RETScreen</i>	59
Figura 40 - Análise de Emissões - <i>RETScreen</i>	60
Figura 41 - Equivalências na quantidade de CO2 reduzida – <i>RETScreen Expert</i>	60
Figura 42 - Preenchimento dos parâmetros financeiros – <i>RETScreen</i>	61
Figura 43 - Dados - Receita anual – <i>RETScreen</i>	61
Figura 44 - Resumo viabilidade financeira – <i>RETScreen</i>	62
Figura 45 - Fluxo de caixa cumulativo – <i>RETScreen</i>	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Publicações Plataforma “ <i>Science Direct</i> ” sobre GD no mundo.....	24
Gráfico 2 - Publicações Plataforma “ <i>Science Direct</i> ” sobre GDFV no mundo.....	25
Gráfico 3 - Áreas dos trabalhos apresentados na CBENS - 2018	26
Gráfico 4 - Consumo ponta e fora ponta (kWh) da estação JK em 2019	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento das Edições CBENS	25
Tabela 2 -Registro do Consumo mensal da estação JK em 2019	46
Tabela 3 - Registro do Fator de Capacidade no LEA	47
Tabela 4 -Características do módulo da Yingli Solar de modelo YL250P-29b.....	48
Tabela 5 - Valores dimensionados para os módulos FV	51
Tabela 6 - Características do inversor PHB5000D-NS	51
Tabela 7 - Valores dimensionados para o Inversor	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
CBENS	<i>Congresso Brasileiro de Energia Solar</i>
DMRC	<i>Delhi Metro Rail Corporation</i>
FV	Fotovoltaico (a)
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
JK	Juscelino Kubitschek
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
MTA	<i>Metropolitan Transit Authority</i>
PL	Painél de Luz
QDG-BT	Quadro de Distribuição Geral de Baixa Tensão
QF	Quadros de Força
RN	Resolução Normativa
TIR	Taxa Interna de Retorno
UFC	Universidade Federal do Ceará
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Estrutura do trabalho	15
2	ESTADO DA ARTE: A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA	16
2.1	Geração Distribuída.....	16
2.1.1	<i>Geração distribuída fotovoltaica</i>	17
2.1.2	<i>Resolução Normativa</i>	18
2.2	Cenário da Geração Distribuída Fotovoltaica	20
2.2.1	<i>Cenário mundial</i>	20
2.2.2	<i>Cenário Brasileiro</i>	22
2.3	Trabalhos Acadêmicos.....	24
2.3.1	<i>CBENS</i>	25
2.4	Casos de aplicação de Geração FV no abastecimento de Estações de Metrô	26
2.4.1	<i>Estados Unidos</i>	26
2.4.2	<i>Índia</i>	27
2.4.3	<i>Brasil</i>	28
3	CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRÔ EM ESTUDO	30
3.1	Características Gerais	30
3.2	Alimentação de Energia Elétrica	31
3.3	Área para instalação da planta FV	31
4	ESTUDO DE SOMBREAMENTO PARA PLANTA FV	36
4.1	Ferramentas utilizadas	36
4.1.1	<i>SketchUp</i>	36
4.1.2	<i>RETScreen</i>	37
4.2	Estudo do sombreamento	38
4.3	Área útil para instalação dos módulos FV.....	43
5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FV.....	46
5.1	Análise da fatura de energia elétrica da Estação JK.....	46
5.2	Fator de Capacidade FV para Fortaleza	47
5.3	Características do módulo FV	48
5.4	Dimensionamento do Sistema	49
5.4.1	<i>Quantidade máxima de módulos FV</i>	49
5.4.2	<i>Potência nominal do sistema</i>	50
5.4.3	<i>Quantidade de módulos FV</i>	50
5.4.4	<i>Inversor</i>	51

5.4.5	<i>Representação no SketchUp</i>	53
6	ESTUDO DA VIABILIDADE DO PROJETO.....	55
6.1	Configurações Iniciais	55
6.2	Modelo Energético	56
6.3	Análise de Custos	58
6.4	Análise de Emissões	59
6.5	Análise Financeira	61
7	CONCLUSÃO	63
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A geração solar fotovoltaica (FV) está em constante expansão aos longos dos últimos anos. Por ser uma forma de geração de fácil implantação, necessidade de manutenção e mão de obra reduzidas e por apresentar baixos impactos ao meio ambiente, a geração solar FV vêm se tornando cada vez mais atraente para as mais diversas unidades consumidoras, sejam elas residenciais, prediais, empresariais etc. Empresas que buscam formas de geração limpa e redução nos custos das contas de energia encontram na energia solar uma ótima oportunidade de investimento.

Companhias na área de transporte metro ferroviário, por exemplo, apresentam grande potencial, pois geralmente dispõem, nas estações, de grandes e numerosos espaços expostos aos raios solares. O Metrofor, empresa objeto de estudo nesse trabalho, demonstra especial interesse, pois este se localiza na cidade de Fortaleza, evidenciando ótimas condições para a implantação de um sistema de geração distribuída FV, como será visto nos capítulos seguintes.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica e financeira na implantação de painéis FV na estação Juscelino Kubitschek da linha Sul em Fortaleza, Ceará. Para isso, é feito o estudo das faturas de energia da estação durante os meses de janeiro a dezembro de 2019, determinando os parâmetros técnicos necessários para suprir a energia consumida no local. Ao final da análise financeira, é dado o valor do investimento inicial do projeto como também o retorno mensal e o tempo de recuperação do capital, assim como todas as taxas e a quantidade em toneladas de CO₂ que deixaria de ser emitida pela implantação do sistema.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica e financeira de um projeto de GDFV em uma estação de metrô de Fortaleza, determinando todos os dados necessários para a implantação dos painéis FV e todos os custos e taxas envolvidos no processo.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em introdução, 5 capítulos teóricos, organizados de forma a facilitar a compreensão de todos os dimensionamentos e dos valores financeiros obtidos, e conclusão.

No capítulo 2 é feito o estudo do estado da arte da GDFV, expondo o cenário atual no Brasil e do mundo, assim como o histórico da implantação dessa forma de geração em outras companhias metro ferroviárias.

No capítulo 3 é realizada a caracterização da estação em estudo, determinando também a área livre disponível para a implantação do projeto.

No capítulo 4 é realizado o estudo do sombreamento afim de determinar qual é, de fato, a área útil para a implantação dos painéis FV.

No capítulo 5 é feito o dimensionamento do sistema solar FV.

No capítulo 6 é realizada a análise financeira do projeto por meio do *software RETScreen*.

No capítulo 7 se encontram as conclusões do trabalho.

2 ESTADO DA ARTE: A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Neste capítulo são detalhados conceitos referentes à geração distribuída (GD), com ênfase na geração FV e em seu cenário atual. São também elucidadas as normas que regem a regulamentação desta geração, assim como os avanços que vêm sendo alcançados no universo acadêmico no que tange ao planejamento e instalação de sistemas de GDFV no Brasil e no mundo. Por fim são ilustrados casos bem-sucedidos do aproveitamento da geração FV em estações de outras companhias metro ferroviárias no abastecimento elétrico das mesmas.

2.1 Geração Distribuída

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estipula a GD como a instalação de geradores de pequeno porte, usualmente alimentados por fontes renováveis ou cogeração qualificada, os quais são localizados próximos aos centros consumidores de energia elétrica (ANEEL, 2016). Na figura 1, é possível observar que uma dada fonte, no caso a FV, pode ser integrada tanto a um sistema de GD quanto a um sistema de geração centralizada (GC), estando de acordo com a norma vigente.

Figura 1- Mapa de Geração Distribuída de Energia



Fonte: (BlueSol, 2018).

O aproveitamento do sistema de GD, oferece diversas vantagens, tanto para o consumidor e para a concessionária como para o sistema elétrico em si, visto que a eletricidade gerada, por estar próxima da unidade consumidora e não necessitar do uso do sistema de transmissão, acarreta a consequente redução das perdas por este processo, além de reduzir o carregamento das redes e não haver a necessidade de expansão das mesmas.

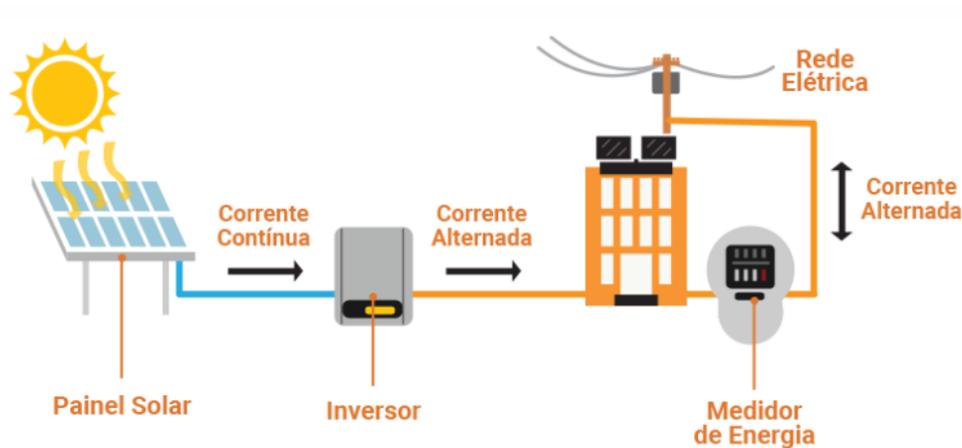
No entanto, algumas considerações devem ser feitas antes da implantação de um sistema de GD. O investimento inicial e a burocracia existente para a conexão do sistema gerador à rede devem ser ponderados pelo consumidor, assim como a intermitência natural do recurso solar. Deve-se, assim, haver o devido estudo da área em que o sistema de GDFV será implantado, levando em consideração a falta da previsibilidade e estabilidade quanto aos efeitos meteorológicos envolvidos (Naruto, 2017).

2.1.1 Geração distribuída fotovoltaica

Como exposto no item anterior, geradores instalados junto à unidade consumidora e alimentados por fontes renováveis podem ser considerados parte de sistemas de GD. As fontes renováveis definidas pela resolução da ANEEL são: solar, eólica, biomassa e hídrica. (ANEEL, 2012). Dentre estas, a que possui maior potencial de captação e a maior facilidade de instalação e operação em centros urbanos é a solar FV.

Na figura 2 é possível visualizar um sistema de GDFV. A eletricidade gerada através de módulos FV é conectada à rede de distribuição, onde, por meio de um medidor de energia bidirecional, ou dois medidores unidirecionais, é possível quantificar a eletricidade gerada e a consumida e dessa forma determinar o saldo excedente ou devedor que será convertido em créditos de energia e descontado da conta final do consumidor.

Figura 2 - Modelo de Geração Distribuída Fotovoltaica



Fonte: (Perfil Energia, 2017).

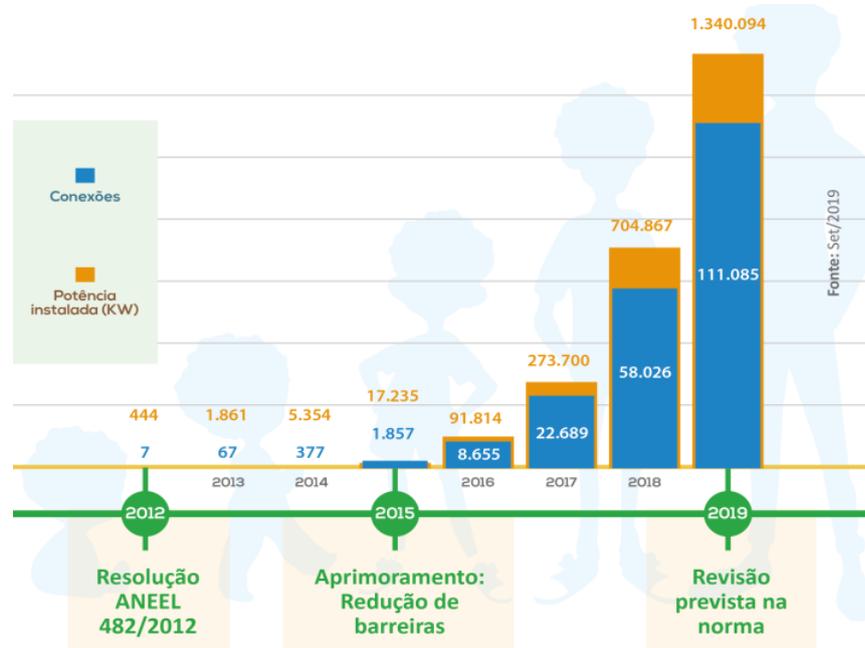
2.1.2 Resolução Normativa

Em 2012 a ANEEL vigorou a Resolução Normativa (RN) N° 482/2012, estabelecendo os critérios a serem cumpridos para a conexão de sistemas de micro e minigeração às redes de distribuição de energia elétrica. Nesta mesma resolução foi também convencionado o programa de compensação de energia, onde a energia disponibilizada pelo sistema distribuído gera créditos para o consumidor que serão posteriormente compensados na conta final (ANEEL, 2012).

Em 2015 foi lançada a RN N° 687/2015 estipulando algumas alterações da RN 482, de forma a reduzir barreiras e tornar mais atrativo o sistema de compensação ao público consumidor. Termos como autoconsumo remoto, geração compartilhada e geração em condomínios foram introduzidos pela primeira vez. Foi também abordada a redução no tempo de espera da conexão entre o sistema de GD e a rede de distribuição (ANEEL, 2015). Nesta mesma resolução foi prevista uma revisão da norma em 2019, e no dia 15 de outubro foi aberta a Consulta Pública 25/2019 para receber contribuições e propostas de mudanças.

Na figura 3, disponibilizada pela ANEEL, é possível analisar que desde a publicação da RN 482 o número de conexões da rede ao sistema de GD cresce anualmente de forma acelerada e a potência instalada proveniente desse sistema vem se expandindo exponencialmente de forma concomitante.

Figura 3 - Crescimento da Geração Distribuída desde a Resolução Normativa de 2012

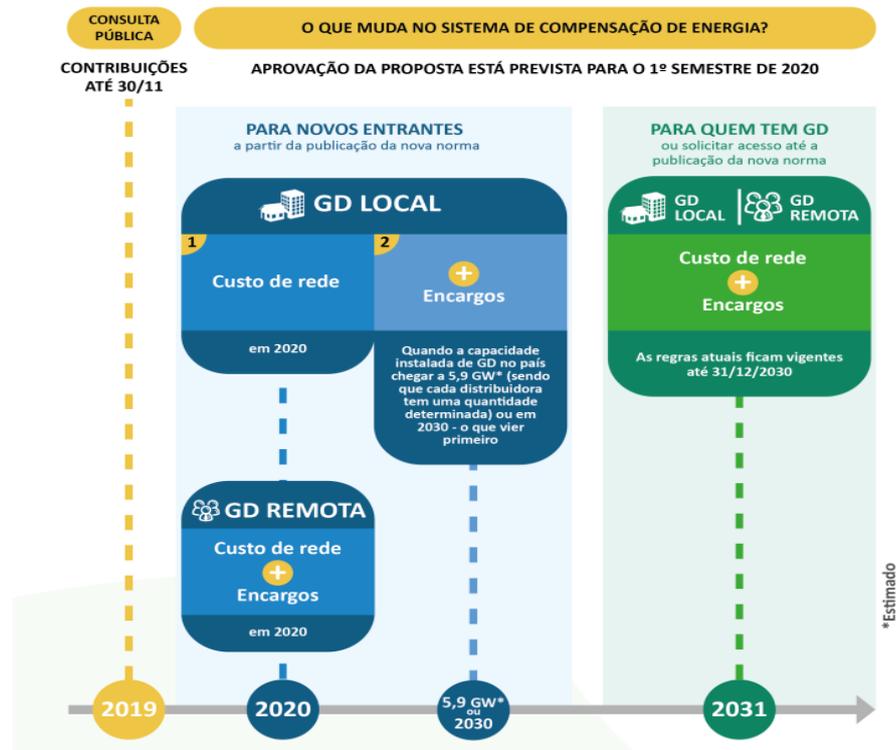


Fonte: (ANEEL, 2019).

Atualmente, consumidores da baixa tensão que possuem o sistema de GD e fazem uso do sistema de compensação não pagam todas as componentes da tarifa de fornecimento da energia que foi consumida e que foi compensada pela energia injetada a rede. As mesmas são saldadas pelos consumidores que não se utilizam da GD. Com as novas propostas que foram apresentadas na consulta pública de 2019 haveria uma revisão de tais custos (valores referentes ao uso da rede de distribuição, encargos e etc) de forma que os mesmos seriam debitados dos consumidores que possuem a GD, de forma a equilibrar os gastos. Desta forma, a dinâmica seria mais balanceada e não impactaria os consumidores que não fazem parte do sistema de GD. A aprovação da proposta estava inicialmente prevista para o primeiro semestre de 2020 (ANEEL, 2019), no entanto, devido às novas condições apresentadas pelo COVID-19, estima-se que a mesma deve ser concluída até março de 2021 (ABSOLAR, 2020).

A Figura 4 mostra a proposta inicial das novas alterações para consumidores que já fazem parte do sistema e para os que entrarão após a aprovação da proposta.

Figura 4 - Dinâmica das alterações da Consulta Pública de 2019



Fonte: (ANEEL, 2019).

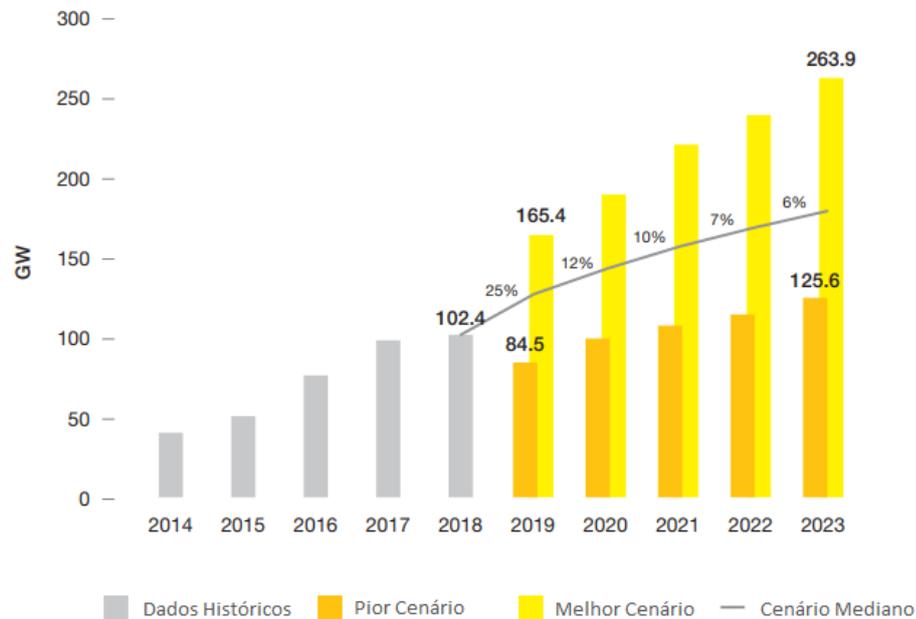
2.2 Cenário da Geração Distribuída Fotovoltaica

2.2.1 Cenário mundial

Em busca da diversificação da matriz energética, o papel da geração de eletricidade proveniente de fontes renováveis vem se tornando cada vez mais significativo. A procura pela maior sustentabilidade no processo de geração, a redução dos efeitos nocivos causados ao meio ambiente e a política dos créditos de carbono incentivam os países a investirem cada vez mais em fontes de energia limpa, aonde, neste cenário, a geração solar FV vem ganhando destaque.

Na Figura 5 é possível analisar a projeção do crescimento da geração FV entre os anos de 2019 e 2023, tomando como base os dados obtidos nos anos anteriores. Observa-se que para o melhor cenário projetado, no ano de 2023, para a fonte solar FV, haveria uma adição de 263,9 GW de potência instalada e, mesmo para o pior caso, haveria uma contribuição anual de 125,6 GW, valores considerados positivos e promissores (Global Market Outlook, 2019).

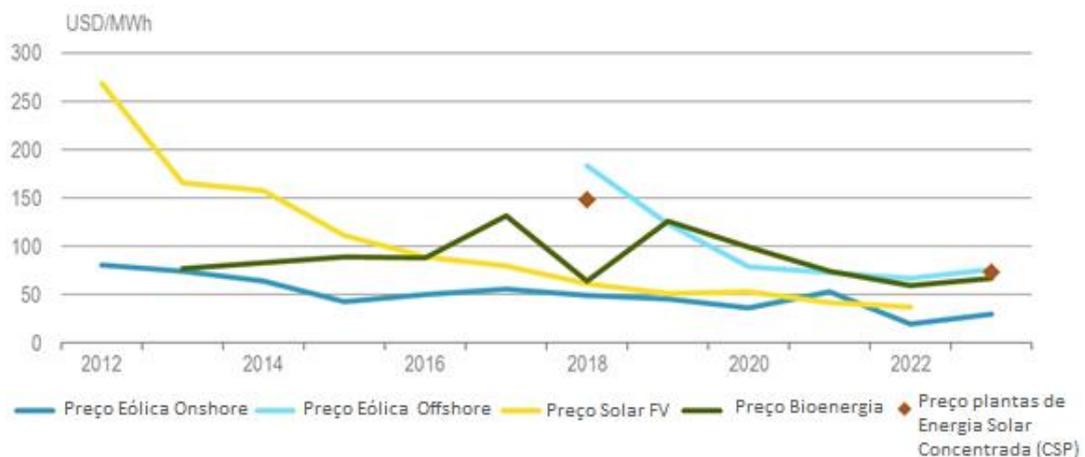
Figura 5 - Projeção do crescimento da potência FV instalada anualmente no mundo 2019-2023



Fonte: Adaptado de Global Market Outlook, 2019.

É importante destacar que concomitante ao crescimento dos investimentos destinados à esta forma de geração há uma significativa redução de custos apresentada, devido ao aumento da escala da produção e ao avanço da tecnologia, por exemplo. Na figura 6 pode-se observar a queda quase que exponencial dos custos da geração FV do ano de 2012 até o ano de 2020, havendo uma estimativa de contínua redução para os anos seguintes (IEA, 2019).

Figura 6 - Custos da geração de energia proveniente das fontes solar FV e eólica no mundo no período de 2012-2022



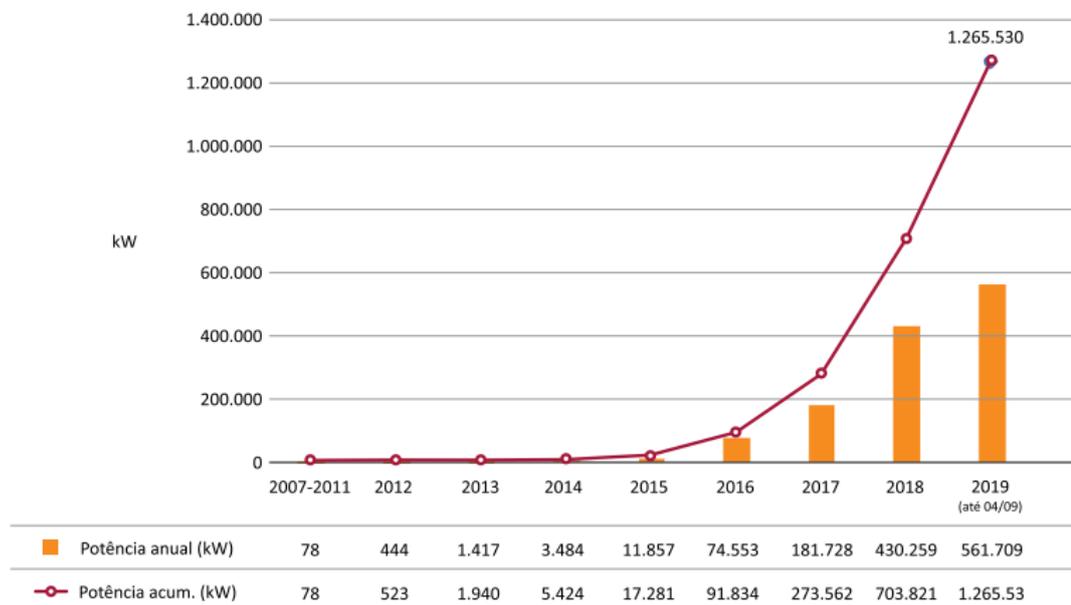
Fonte: Adaptado de IEA, 2019.

2.2.2 Cenário Brasileiro

Aproximadamente 83% da geração no Brasil é proveniente de fontes de energia limpa, sendo a hidrelétrica a mais expressiva entre elas (Ministério de Minas e Energia, 2020). No entanto, quando falamos de GD o cenário é outro.

A figura 7 mostra a evolução da GD no Brasil, desde 2012, data da publicação da RN 482 até o início de 2019. Em apenas quatro meses de 2019, a potência instalada em GD atingiu a marca de 1,265 GW (BNB/ETENE/Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais, 2019).

Figura 7- Evolução da GD no Brasil 2007-2019 (kW)



Fonte: (BNB/ETENE/Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais, 2019).

Quando direcionamos o estudo para a GD, a geração FV se destaca dentre as tecnologias utilizadas, representando 88,51% do total gerado nos dados analisados até abril de 2019. Na figura 8, observa-se que a região sudeste é a que mais se destaca na GDFV, com quase 40% da geração total do país, seguida pela região sul, com 26,13% e pela região nordeste, com 16,95% (BNB/ETENE/Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais, 2019).

Figura 8 - Capacidade instalada de GD por fonte no Brasil em setembro de 2019

UNIDADE GEOGRÁFICA	FOTOVOLTAICA		CGH		UTE		EOL		TOTAL	
	Potência (kW)	Brasil (%)								
Brasil	1.120.193,93	100,00	88.022,60	100,00	46.999,54	100,00	10.314,40	100,00	1.265.530,47	100,00
Norte	31.933,40	2,85	6.505,52	7,39	194,00	0,41	2,00	0,02	38.634,92	3,05
Centro-Oeste	160.013,24	14,28	28.141,50	31,97	3.912,32	8,32	-	-	192.067,06	15,18
Sul	292.720,46	26,13	7.913,50	8,99	17.117,32	36,42	62,30	0,60	317.813,58	25,11
Sudeste	445.649,79	39,78	44.512,08	50,57	25.747,52	54,78	35,40	0,34	515.944,79	40,77
Nordeste	189.877,04	16,95	950,00	1,08	28,38	0,06	10.214,70	99,03	201.070,12	15,89

Fonte: (BNB/ETENE/Célula de Estudos e Pesquisas Setoriais, 2019).

Em 2020, a geração FV atingiu a marca de 94,8% da potência instalada de micro e minigeração distribuída no Brasil, alcançando o valor de 3,42 GW. De acordo com os dados da ANEEL/ABSOLAR os estados brasileiros com maior participação no mercado são Minas Gerais, Rio Grande do Sul e São Paulo, que detêm juntos aproximadamente 45% da potência instalada do país (ABSOLAR, 2020).

Figura 9 - Ranking Estadual da Potência Instalada em GDFV no Brasil em 2020



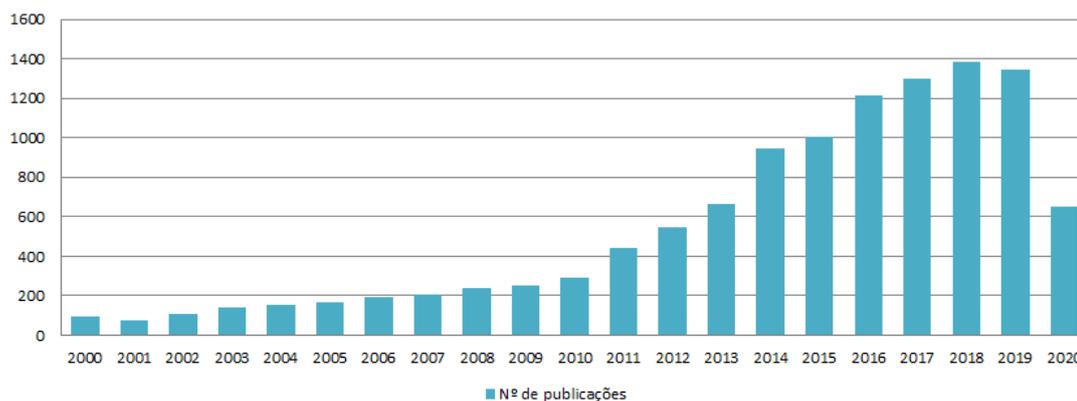
Fonte: (ABSOLAR, 2020).

Como visto na figura 9, o Ceará é o 9º estado destaque na geração FV, com 121 MW de potência instalada, representado 3,5% da produção nacional. No entanto, quando se analisa a geração por municípios a capital do Ceará é a 3º maior geradora do país com 34 MW de potência instalada (ABSOLAR, 2020).

2.3 Trabalhos Acadêmicos

Em face da contínua e crescente expansão da GDFV, o número de pesquisas acadêmicas neste campo vem crescendo consideravelmente. Com o intuito de aperfeiçoar cada vez mais o sistema de geração, reduzir perdas durante o processo e desenvolver a tecnologia dos equipamentos, buscando sempre a inovação do setor e o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, instituições de ensino e companhias de caráter privado investem intensamente no estudo desta área. Por meio do “*Science Direct*” base de dados de artigos e trabalhos acadêmicos da literatura científica, é possível analisar a progressão no número de pesquisas realizadas nas áreas de GD e GDFV anualmente pelo mundo (*Science Direct*, 2020).

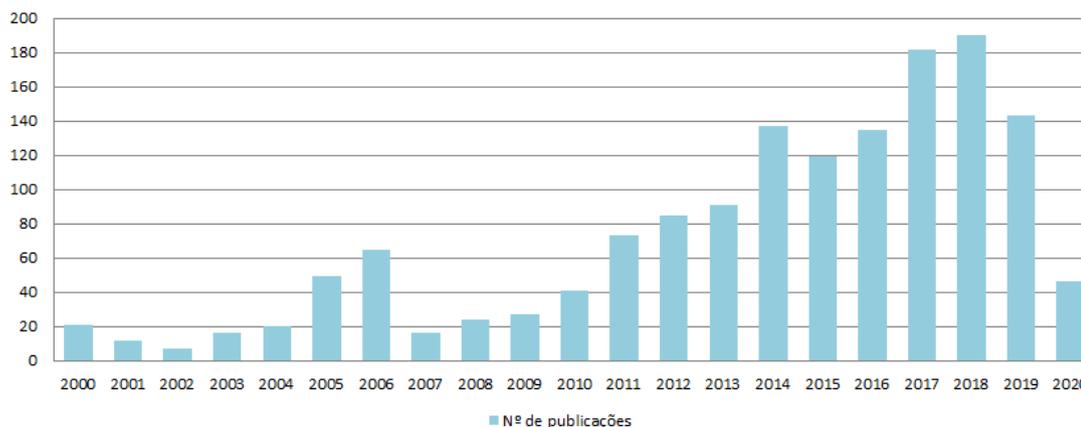
Gráfico 1 - Publicações Plataforma “*Science Direct*” sobre GD no mundo



Fonte: Adaptado do “*Science Direct*”.

É possível deduzir no gráfico 1 o aumento significativo no número de pesquisas de desenvolvimento da área a partir de 2010, chegando a quase 1400 publicações nos anos de 2018 e 2019 (*Science Direct*, 2020). Destaca-se que o ano de 2020 abrange apenas os dados de publicações feitas até o mês de março, sendo assim estima-se que o número de artigos publicados continue crescendo.

No gráfico 2 observam-se os dados quando há o aumento do filtro na plataforma de busca, mantendo a linha de interesse na GDFV. O comportamento observado é semelhante ao da busca anterior, chegando a quase 200 trabalhos publicados em 2018 (*Science Direct*, 2020).

Gráfico 2 - Publicações Plataforma “*Science Direct*” sobre GDFV no mundo

Fonte: Adaptado do “*Science Direct*”.

2.3.1 CBENS

No Brasil, o principal evento técnico-científico na área de tecnologias de conversão de energia solar é a CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar. Sua primeira edição tomou espaço em 2007 na cidade de Fortaleza, onde, a partir de 2008, tornou-se um evento bianual. Em 2020 o evento está em sua oitava edição e será sediado na mesma cidade cearense. Na tabela 1 estão registrados os dados de trabalhos apresentados no período de 2012 a 2018, data de sua última edição. Pode-se observar que a cada ano, o número de publicações apresentadas cresce em relação à edição anterior e, em 2018, o número de artigos inscritos foi superior ao dobro de sua 4ª edição, em 2012.

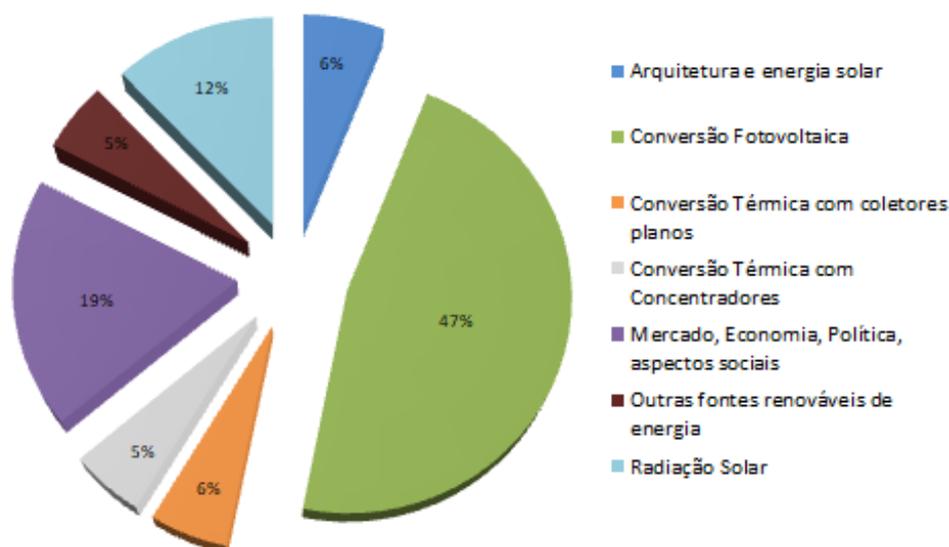
Tabela 1 - Detalhamento das Edições CBENS

Edição	Nº de Trabalhos	Estado	Cidade
2012	147	São Paulo	São Paulo
2014	201	Pernambuco	Recife
2016	287	Minas Gerais	Belo Horizonte
2018	363	Rio Grande do Sul	Gramado

Fonte: Adaptado do ABENS.

Em 2018, 363 trabalhos foram apresentados, sendo eles divididos nas áreas de: radiação solar, conversão térmica com coletores planos, conversão térmica com concentradores, conversão fotovoltaica, arquitetura e energia solar, outras fontes de energia renováveis e mercado, academia, política e aspectos sociais envolvendo a tecnologia (CBENS, 2018).

Gráfico 3 - Áreas dos trabalhos apresentados na CBENS - 2018



Fonte: Adaptado da CBENS, 2018.

Assim como observado no gráfico 3, dentre os trabalhos apresentados na convenção de 2018 a área com o maior número de artigos apresentados foi a de Conversão FV, representando 47% dos trabalhos expostos no congresso. Em contrapartida, as áreas de menor destaque foram às relacionadas às outras fontes renováveis de energia (biomassa – eólica – ondas e marés) com 5% de representação, e a conversão térmica com concentradores, com 5%.

2.4 Casos de aplicação de Geração FV no abastecimento de Estações de Metrô

2.4.1 Estados Unidos

A MTA (*Metropolitan Transit Authority*), companhia metro ferroviária de Nova York, nos Estados Unidos, foi a primeira a utilizar energia proveniente da geração FV no abastecimento de suas redes. Em 2005 foi inaugurada a primeira usina solar da companhia, no Terminal *Coney Island-Sitwell Avenue*, localizada no Brooklyn. Na estação, em uma área de 7100 m², foram instalados 2800 módulos FV, capazes de gerar uma potência total de 210 kWp (Bernardes, Santos, Junior, & Saito, 2013). Na Figura 10, é possível observar a estrutura da instalação dos módulos cobrindo toda a estação.

Figura 10 - Terminal *Coney Island-Sitwell*

Fonte: (Brooklyn Daily Eagle, 2019).

No entanto, apesar de todo o potencial apresentado pelo projeto, a estação não fornece eletricidade desde 2012. Após o terminal ser inundado durante o furacão Sandy, diversos equipamentos elétricos foram danificados ao ficarem submersos. Todavia, os módulos FV resistentes à furacões permaneceram intactos. Em maio de 2014 a MTA declarou seus planos para reabilitação do sistema, mas mesmo após 5 anos, os painéis permanecem off-line (Brooklyn Daily Eagle, 2019).

Em 2005, 15% da estação era abastecida pela eletricidade gerada pelos painéis, gerando o equivalente a 250.000 kWh de energia por ano. Caso o sistema ainda estivesse em funcionamento, a companhia metro ferroviária poderia ter economizado cerca de US \$ 367.500 (Brooklyn Daily Eagle, 2019).

2.4.2 Índia

Em 2019 a companhia metroviária DMRC (*Delhi Metro Rail Corporation*), localizada na cidade de Delhi, na Índia, utilizava cerca de 60% de toda a energia consumida nas estações e prédios administrativos provenientes de abastecimentos por módulos FV e usinas solares (Daily Metro Rail, 2019). Inicialmente, a eletricidade gerada era proveniente de painéis instalados nos tetos das próprias estações e prédios da companhia, na alimentação de ar-condicionados e iluminação de salas técnicas, bilheterias e plataformas. Em março de 2017 a companhia já possuía uma capacidade instalada de 20 MWp de potência em coberturas de diversas instalações (IRENA, 2018). No entanto, com o intuito de aumentar o uso de energia limpa, a empresa passou a contar com o abastecimento da usina solar Rewa Ultra Mega Solar,

uma das maiores usinas solares do mundo com capacidade total de 750 MWp (Confederation of Indian Industry, 2019). A energia recebida será utilizada não apenas para o abastecimento interno das instalações, mas também para a operação dos próprios metrô e trens da companhia. A Figura 11 ilustra um dos estabelecimentos pertencentes à DMRC com módulos FV em sua cobertura.

Figura 11 - Prédio da companhia DMRC com instalação de módulos FV no teto



Fonte: (Metro Rail News, 2017).

A DMRC pretende expandir seu sistema de abastecimento de forma a ser capaz de fornecer uma potência total de 50 MWp com módulos FV distribuídos em todas as suas instalações (Confederation of Indian Industry, 2019). Estima-se que em 2021, toda a alimentação da rede metroviária se dará por meio da geração FV, sendo a primeira companhia a atingir este feito.

2.4.3 Brasil

Em outubro de 2017, a Companhia do Metropolitano do Distrito Federal (Metrô-DF) inaugurou a primeira estação da América Latina alimentada pela captação de raios solares. A Estação Guariroba, na cidade de Ceilândia, é a quarta do mundo autossuficiente em energia elétrica, ficando atrás de Milão, Nova York e Nova Deli, que já possuem estações que operam pelo abastecimento de energia derivado da geração FV. A estação Guariroba possui 578 módulos FV, com capacidade de 288.000 kWh de energia por ano (Governo de Brasília, 2018).

Na figura 12 é possível visualizar a Estação Guariroba vista de cima e de como os módulos FV estão dispostos na cobertura da estação.

Figura 12 - Estação Guariroba – Metrô do DF



Fonte: (ANP Trilhos, 2016).

Em 2018, o segundo projeto de minigeração na Estação Solar Samambaia Sul, em Samambaia, foi inaugurado. Nesta estação foram instalados 561 módulos FV, com capacidade de geração de 308.000 kWh de energia por ano. A Estação pode ser vista na figura 13 (Metrô - DF, 2018).

Figura 13 - Estação Samambaia Sul



Fonte: (Metrô - DF, 2018).

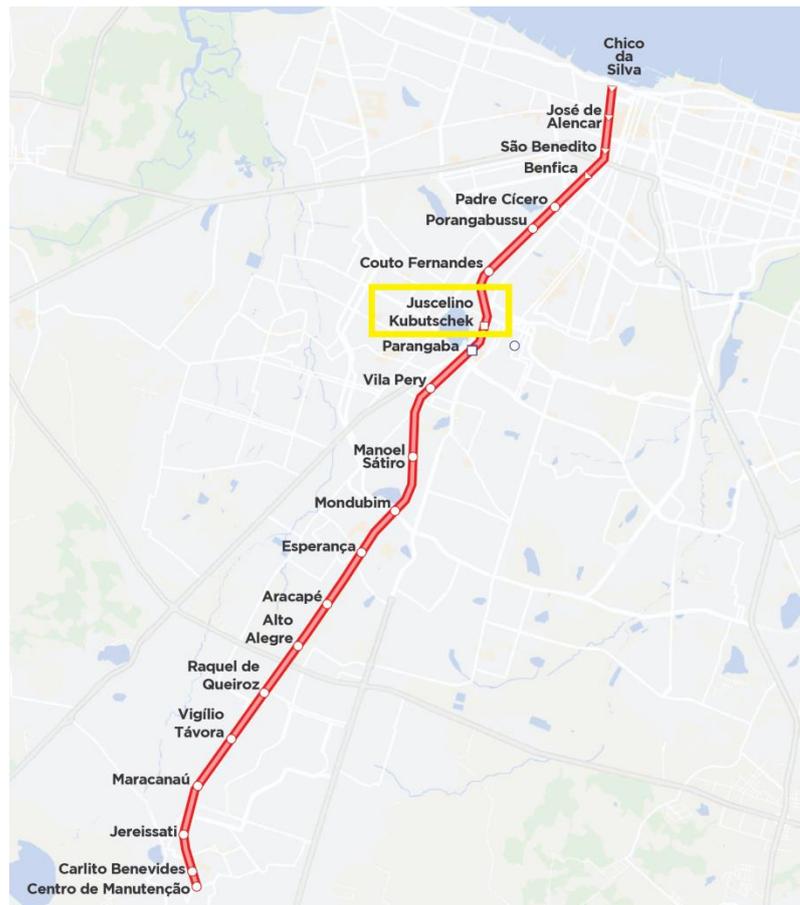
Atualmente a energia proveniente dos módulos FV alimenta o sistema elétrico das estações, como plataforma, bilheteria e salas técnicas, mas não o trem em si. De acordo com o metrô, com funcionamento dos sistemas de geração FV das duas estações, haverá uma economia anual de R\$ 260 mil em gastos com contas de energia, além de o excedente gerado ser vendido como créditos de energia à distribuidora local (Metrô - DF, 2018).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DO METRÔ EM ESTUDO

3.1 Características Gerais

A estação em estudo é a estação Juscelino Kubitschek (JK), localizada na Avenida João Pessoa, no bairro Damas em Fortaleza. Situada entre Parangaba e Couto Fernandes, JK é a 8ª estação da linha Sul, sentido Chico da Silva - Carlito Benevides, e foi a 19ª entregue pela Companhia Cearense de Transportes Metropolitanos. Na figura 14 é possível visualizar a Linha Sul em todos os seus 24,1km de extensão e suas 20 estações em operação, capaz de interligar Fortaleza às cidades de Maracanaú e Pacatuba (Metrofor, 2017). Na ilustração, encontra-se também destacada a localização da estação de interesse.

Figura 14 - Mapa da Linha Sul do METROFOR com destaque à estação JK



Fonte: Adaptado de Metrofor, 2018.

Inaugurada no dia 17 de maio de 2017, a estação JK possui uma área total construída de 3200,56 m² e conta com três andares: térreo, mezanino e plataformas elevadas. No térreo,

andar de acesso à estação a partir da via pública, encontram-se as bilheterias, sala de supervisão operacional (SSO), bloqueios eletrônicos, sala de transformadores e 15 lojas comerciais, cujo acesso se dá pela galeria comercial na parte externa do hall central. No Mezanino, andar intermediário, encontram-se as salas técnicas (sinalização, telecomunicação, painéis e baterias) e as salas operacionais (sanitários, copas, primeiros socorros e etc). Por fim, as plataformas, que se destinam às áreas de parada de trens e embarque e desembarque de passageiros. A estação conta com 2 elevadores e 4 escadas rolantes que dão acesso do térreo às plataformas (Metrofor, 2017).

3.2 Alimentação de Energia Elétrica

A Estação JK foi construída em área de concessão da ENEL e recebe a energia elétrica através de duas alimentações distintas, a primeira em média tensão de 13,8 kV, trifásica e 60 Hz destinada à alimentação da Estação e a segunda através da tensão secundária de 380/220 V para alimentação das lojas. Destaca-se que para a Estação JK não foi previsto um grupo gerador diesel. No presente trabalho será levado em consideração apenas a alimentação da Estação.

A tensão de alimentação da concessionária de 13,8 kV é abaixada para 380/220 V em uma subestação do tipo abrigada, que contém um transformador de 225 kVA, proteção e medição padrão ENEL. A energia, quando em baixa tensão, alimenta o QDG-BT, localizado no nível Mezanino, que por sua vez alimenta os Quadros de Força (QF's) e os Painéis de Luz (PL's).

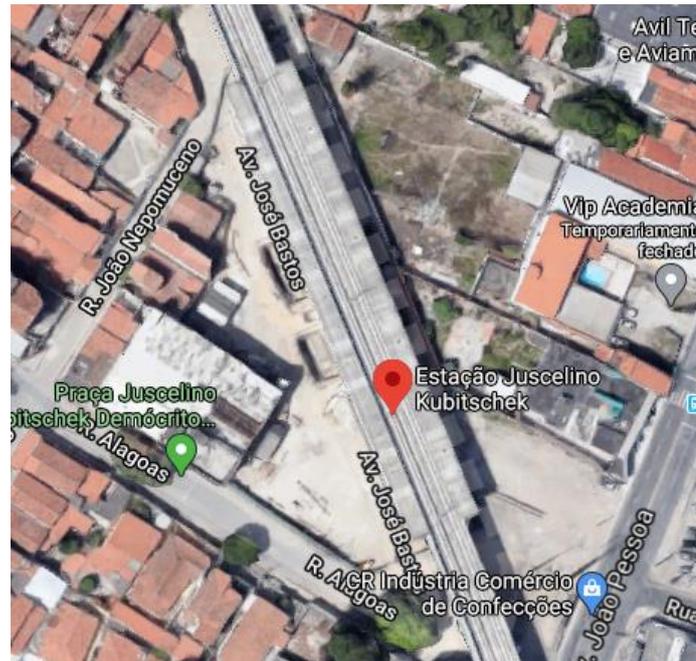
A modalidade tarifária do consumidor é do tipo A4 horosazonal Verde, caracterizada pelas tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com o horário de utilização, ponta e fora ponta, e de uma única tarifa de demanda de potência.

A demanda contratada ponta e fora ponta para a estação é de 35 kW.

3.3 Área para instalação da planta FV

Como destacado no item 3.1 a estação apresenta uma área construída de 3200,56 m², distribuída em: Térreo - 1250,60 m²; Mezanino – 656,96 m² e Plataforma – 1293,00 m². A figura 15 mostra a vista superior da estação obtida através do Google Earth.

Figura 15 - Estação JK vista de cima.



Fonte: Google Earth, 2020.

Utilizando o *SketchUp*, software modelador 3D utilizado em projetos de arquitetura e engenharia, foi realizada a modelagem da estação JK, vista na imagem 16.

Figura 16 - Modelagem da Estação JK no *SketchUp*.



Fonte: O próprio autor.

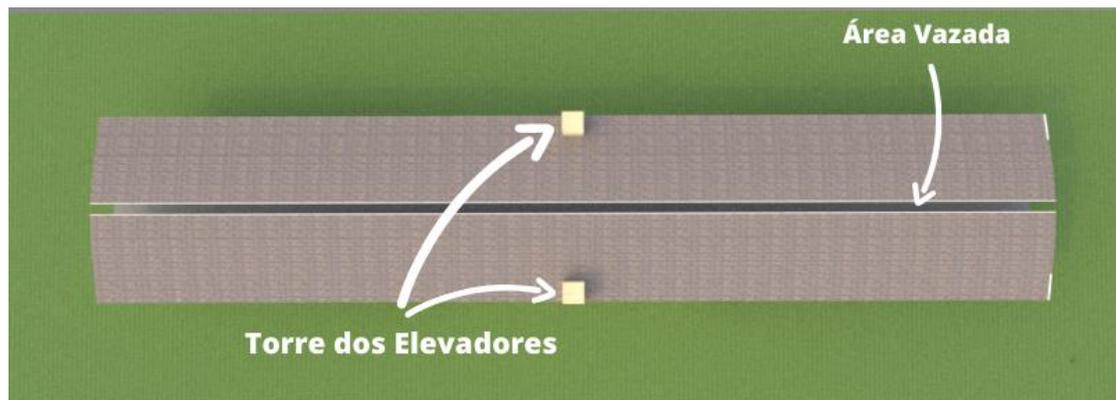
Figura 17 - Vista Frontal das plataformas da Estação JK no *SketchUp*



Fonte: O próprio autor.

Como pode ser observado na figura 17, referente à vista frontal da estação, há uma pequena abertura no meio da cobertura reservada para a fixação da rede área, com uma área “vazada” de aproximadamente 159,31 m².

Figura 18 - Estação JK vista de cima no *SketchUp*.



Fonte: O próprio autor.

Na figura 18 ilustra-se a vista superior da estação onde estão destacadas a área vazada na parte central da cobertura e as duas torres dos elevadores, onde se encontram os reservatórios elevados exclusivos para consumo predial. Cada torre possui 2,40 m de largura e 2,40 m de comprimento e uma altura de 3,64 m acima da cobertura. A figura 19 ilustra de forma mais detalhada uma das torres elevadas.

Figura 19 - Vista das torres dos elevadores no *SketchUp*.



Fonte: O próprio autor.

As plataformas possuem 110 m de comprimento e cobertura em estrutura metálica, mais leves e esbeltas, totalmente abertas ao exterior e adequadamente sombreadas e protegidas de chuvas mais fortes. O teto possui uma área disponível de aproximadamente 2373,36 m², excluindo-se as áreas vazadas e os reservatórios elevados, composta por telhas ondulada com sistema térmico e acústico com lã de vidro, com acabamento liso pintado nas 2 faces. A altura total da edificação se dá por 15,94 m (torres dos elevadores) e 13,60 m (eixo da cobertura da plataforma).

Figura 20 - Vista externa da estação JK.



Fonte: Secretaria de Infraestrutura do Ceará, 2018.

A partir da imagem 20, onde é possível analisar a visão externa da estação, nota-se não há a interferência do sombreamento de prédios e residências vizinhas ou vegetação local, estando presente apenas o sombreamento causado pelas torres dos elevadores em uma pequena área de sua cobertura. Assim sendo, expostas todas as condições, somadas à sua ótima localização geográfica em Fortaleza- Ceará, cidade próxima a linha do equador, a estação apresenta ótimas condições para a implantação de um sistema de GDFV.

4 ESTUDO DE SOMBREAMENTO PARA PLANTA FV

Neste capítulo são detalhadas as ferramentas das quais foram feitos o uso neste projeto, os *softwares SketchUp e RETScreen*. Logo em seguida é realizado o estudo do sombreamento da edificação. Esta etapa desempenha um papel fundamental na realização de um projeto de GDFV, por ser capaz de determinar o impacto de possíveis interferências diretas ou indiretas dos raios solares. O bloqueio total ou parcial pode derivar de elementos físicos externos, como árvores, vegetações e outros prédios vizinhos, ou, como neste caso, o sombreamento causado por partes da arquitetura da própria estação, como mencionado no item anterior, as torres dos elevadores.

4.1 Ferramentas utilizadas

4.1.1 SketchUp

Assim como explicado sobre o *software* no item 3.3, o *SketchUp* foi escolhido pela facilidade da modelagem da estação. Por meio das plantas 2D no *AutoCad*, disponibilizadas pelo Metrofor, foi possível elaborar o design 3D da edificação. Além de, após a devida modelagem com todos as dimensões corretamente simuladas, o *software* capaz de dimensionar a área exata da superfície desejada, plana ou deformada (como no caso da cobertura curva da estação) ou com ou sem irregularidades (como no caso das torres dos elevadores e da área “vazada”) (*SketchUp*). A figura 21 mostra um comparativo da estação e sua simulação, demonstrando como o *software* permite uma modelagem fiel à construção.

Figura 21 - Comparativo da Estação e sua simulação no *SketchUp*

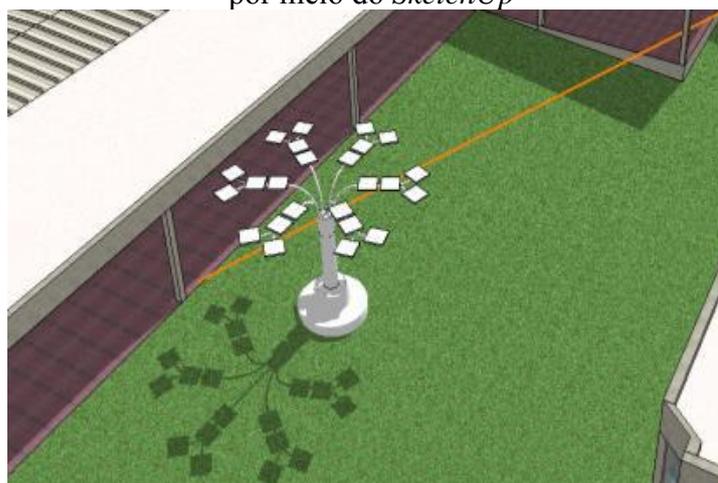


Fonte: O próprio autor.

Outra grande vantagem do *software* explorada é o estudo do sombreamento, visto que o programa consegue alocar a edificação em seu ponto geográfico real e observar o comportamento do sol sobre a estação em todos os meses do ano e em diferentes horas do dia. Tal funcionalidade será melhor abordada no item 4.2.

O *SketchUp* é amplamente utilizado no meio científico, em trabalhos e pesquisas da área. O *software* permite um estudo detalhado na otimização da posição dos módulos FV assim como em arranjos menos usuais como as árvores solares, representada na figura 22, retirada de um trabalho apresentado na CBENS 2018, “Análise técnica e econômica da implementação de um sistema fotovoltaico no modelo de uma árvore na faculdade de tecnologia da universidade de Brasília”(Gouveia, 2018).

Figura 22 - Modelagem de uma árvore solar na Faculdade de Tecnologia da UNB por meio do *SketchUp*



Fonte: (Gouveia, 2018)

4.1.2 *RETScreen*

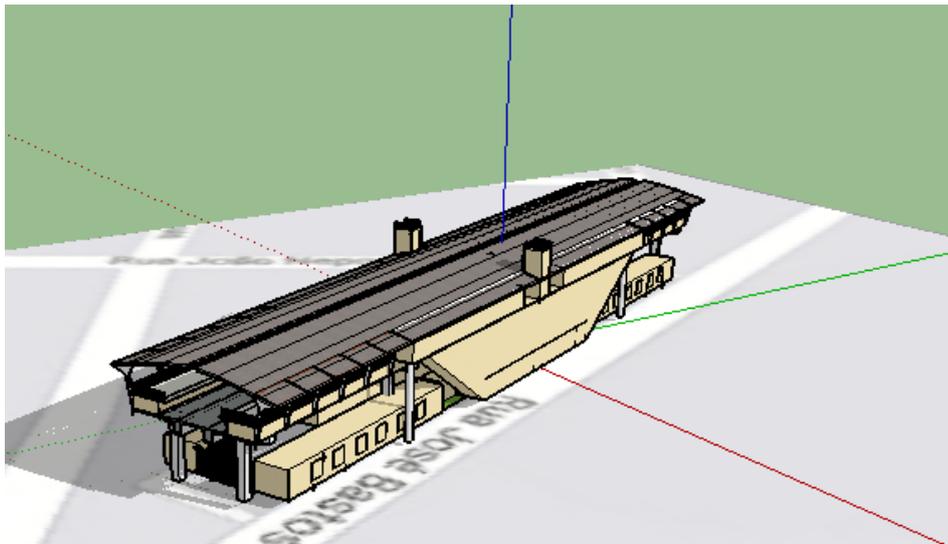
Outra importante ferramenta utilizada no estudo da viabilidade financeira do projeto é o *RETScreen*. O *software*, fornecido gratuitamente pelo governo Canadense, é capaz de fornecer dados essenciais para a implantação de projetos de eficiência energética, energias renováveis e cogeração. O *RETScreen* fornece dados de recursos energéticos no local do projeto, performance de equipamentos, custos iniciais, anuais e periódicos, impostos. O *software* também fornece dados da irradiação solar, que no caso do presente estudo, é a capital do Ceará, Fortaleza (*RETScreen*).

Geralmente em um projeto completo há o uso combinado do *SketchUp* e do *RETScreen* ou outras ferramentas semelhantes que desempenhem os mesmos papéis, conciliando a modelagem e o estudo da viabilidade financeira.

4.2 Estudo do sombreamento

Com base nas coordenadas geográficas obtidas pelo Google Earth ao pesquisar o endereço da estação, foi possível alocar a mesma em sua posição real no *SketchUp* por meio da ferramenta “*Geo-Location*”. A figura 23 ilustra a estação referenciada em sua posição real no *software*. A direção norte-sul é representada pelo eixo de cor verde.

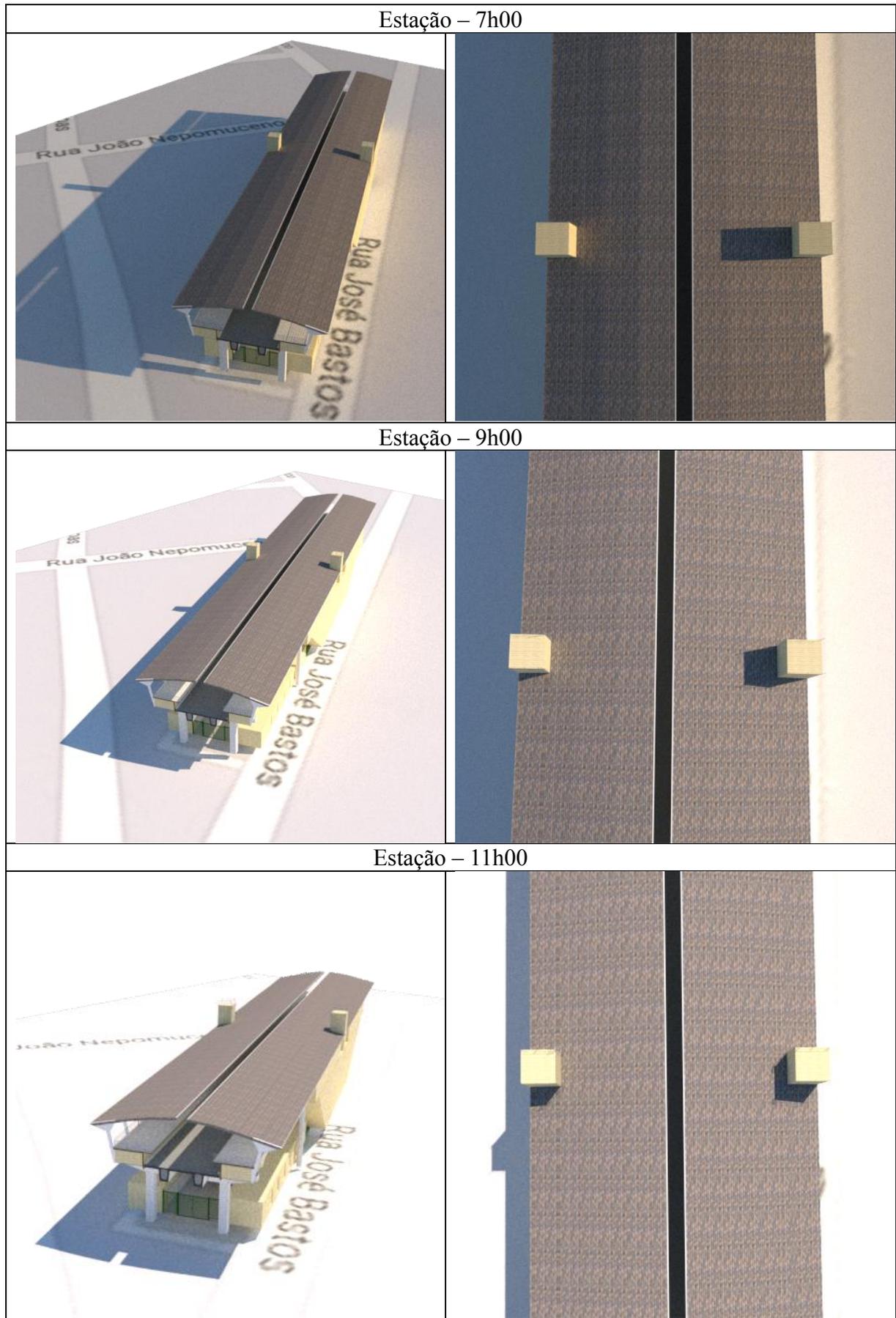
Figura 23 - Enquadramento da Estação em sua posição real no *SketchUp*



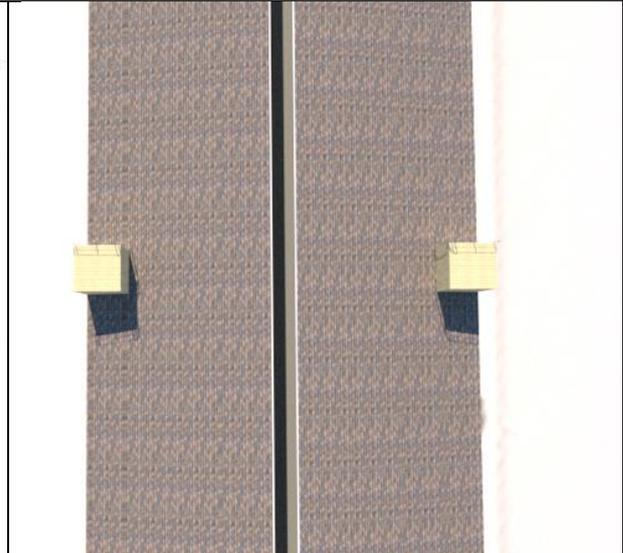
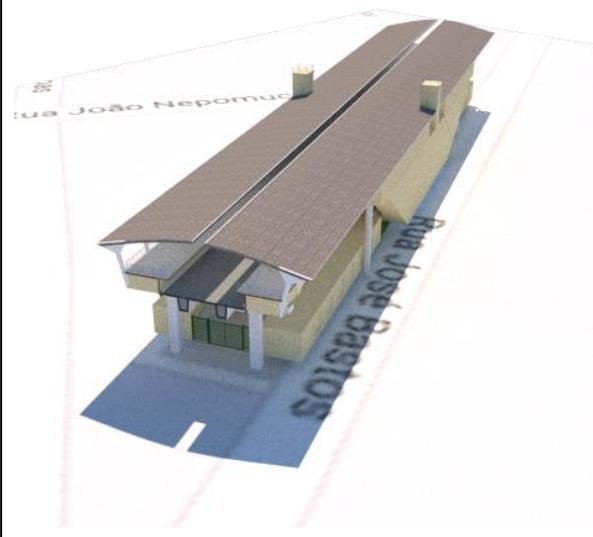
Fonte: O próprio autor.

Após a modelagem tridimensional e a referência geográfica da estação, foi feita a análise de sombreamento por meio da ferramenta “sombas”, que permite observar a trajetória dos raios solares em diferentes horários e meses do ano. Foram então selecionadas as datas de 21 de junho (solstício de inverno) e 21 de dezembro (solstício de verão) em intervalos de 2h das 7:00h as 17:00h, observando sempre as vistas laterais e frontais da edificação. As figuras 24 e 25 ilustram todos os dados obtidos.

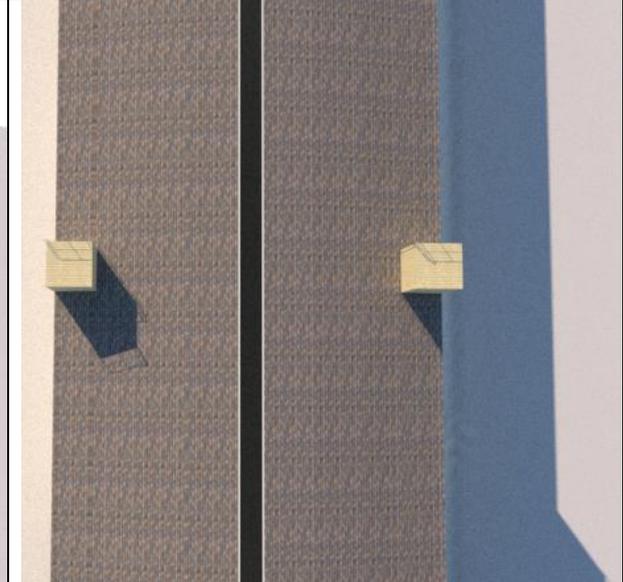
Figura 24 - Estudo do sombreamento da estação – 21 de junho



Estação – 13h00



Estação – 15h00

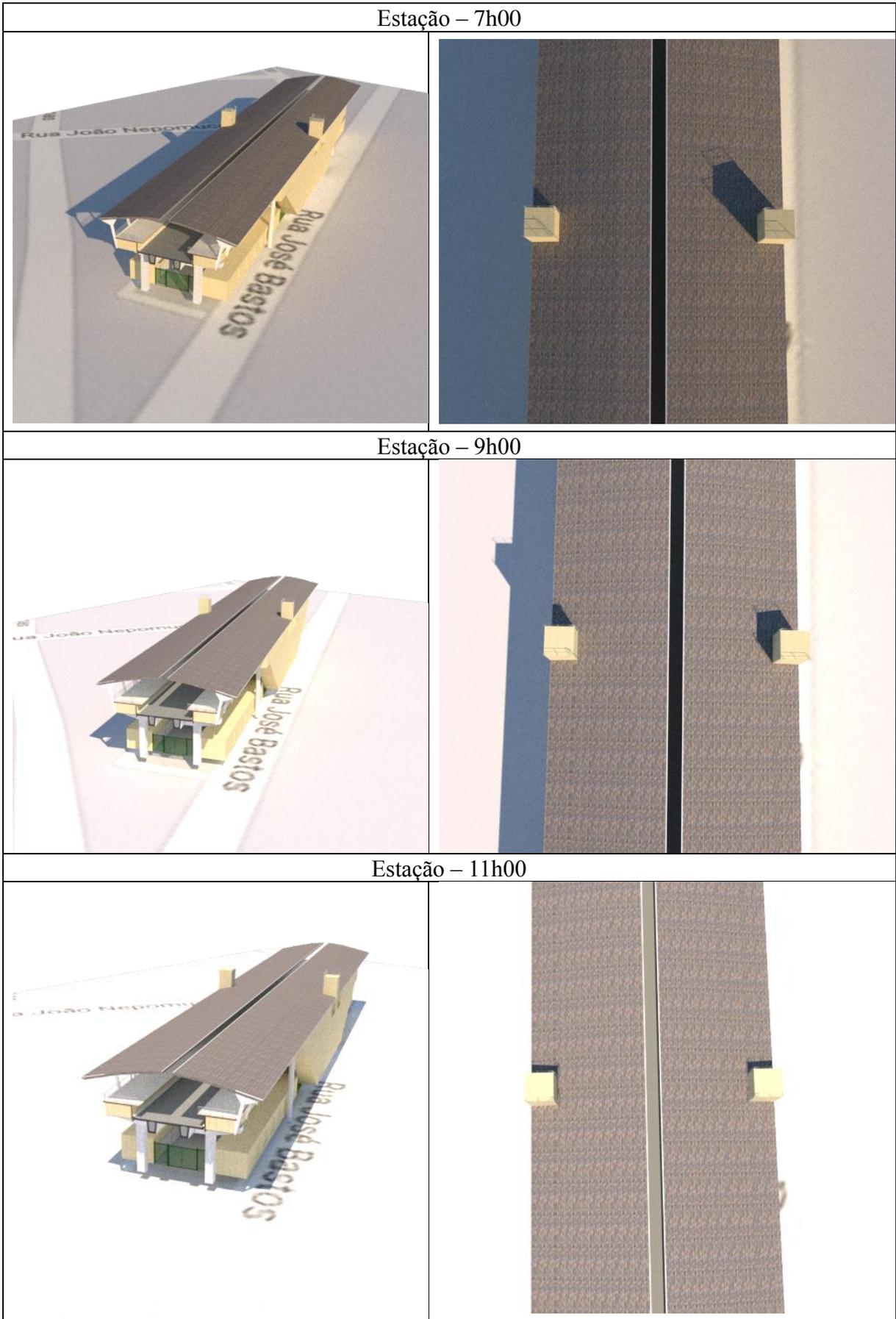


Estação – 17h00

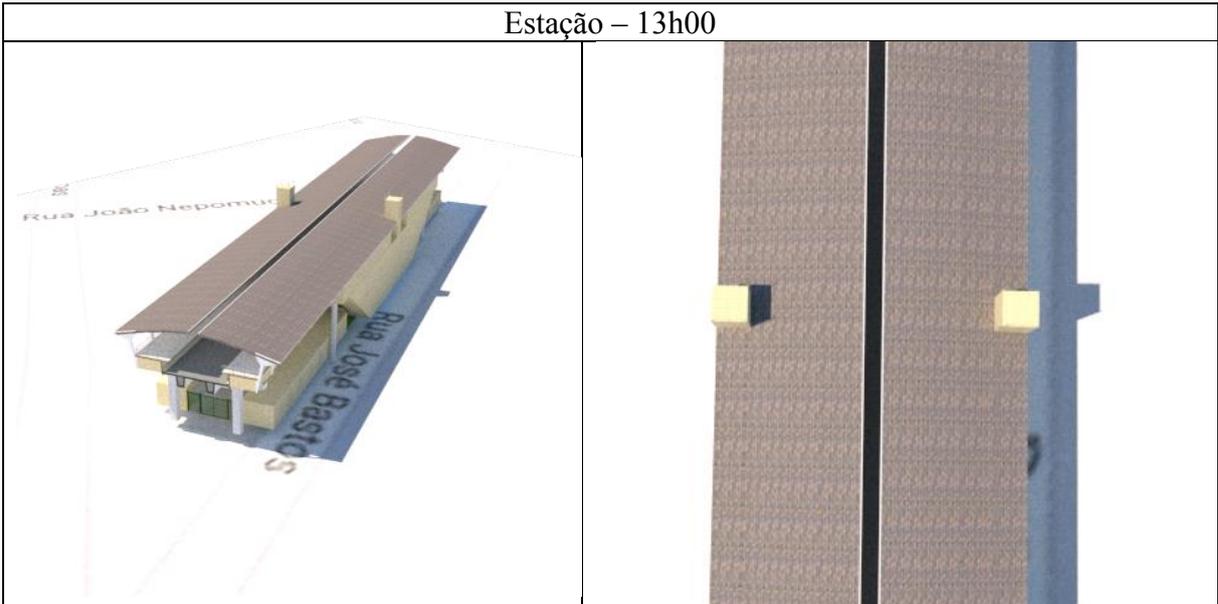


Fonte: O próprio autor.

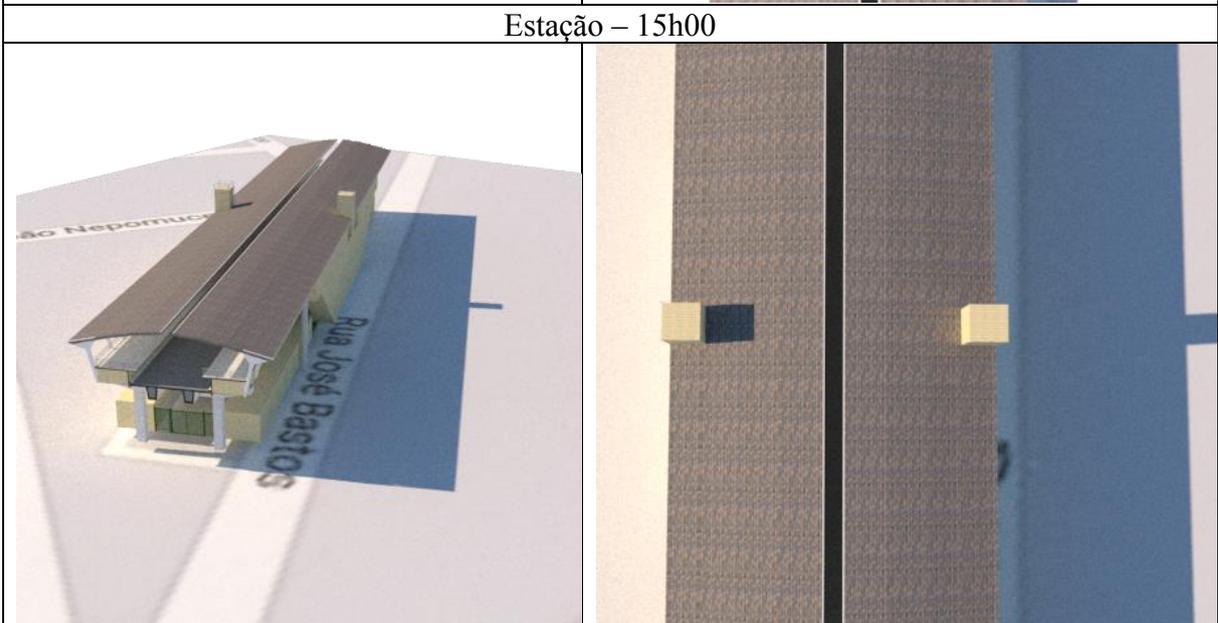
Figura 25 - Estudo do sombreamento da estação – 21 de dezembro



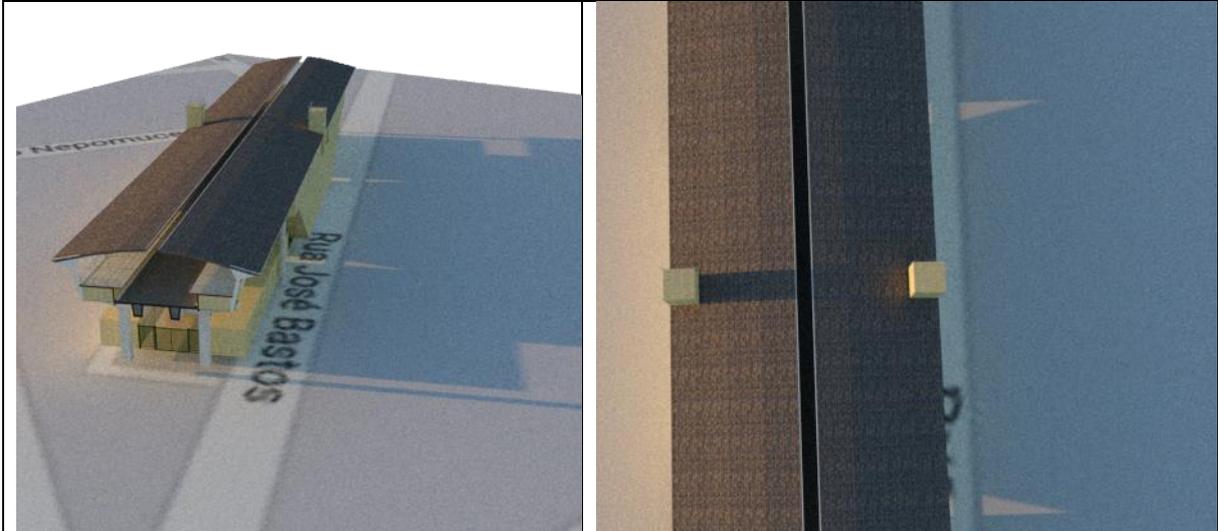
Estação – 13h00



Estação – 15h00



Estação – 17h00



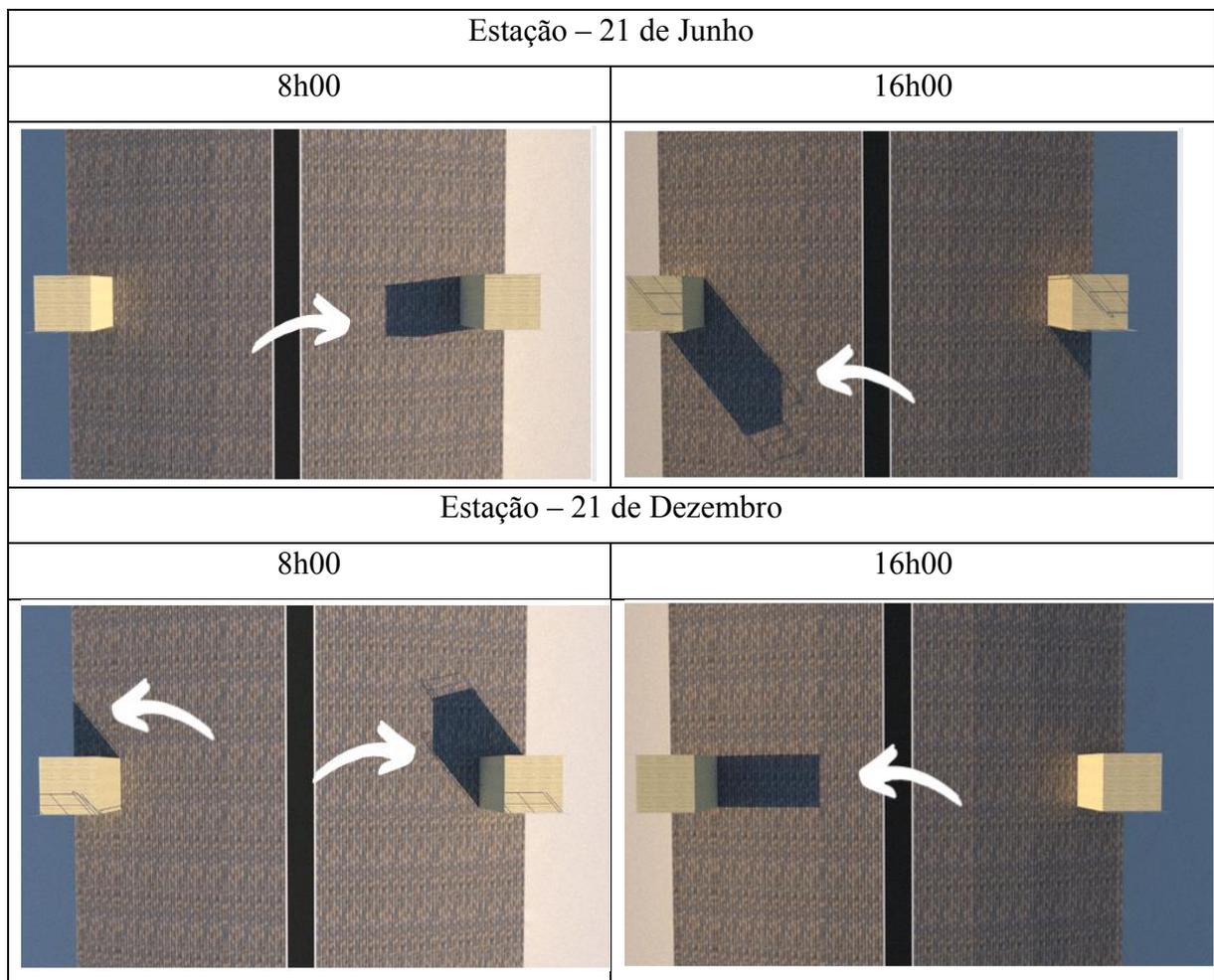
Fonte: O próprio autor.

4.3 Área útil para instalação dos módulos FV

Após realizar a análise da variação da trajetória do sol, optou-se por considerar como área sombreada aquela que é bloqueada dos raios solares no intervalo das 8h00 às 16h00, horário cuja intensidade da irradiação solar é maior, atingindo seu valor máximo por volta de 11h00 às 13h00.

Com base nos dois horários escolhidos, foi delimitada a área que é coberta pela sombra nas duas datas em estudo (21 de junho e 21 de dezembro). O resultado por ser observado na figura 26.

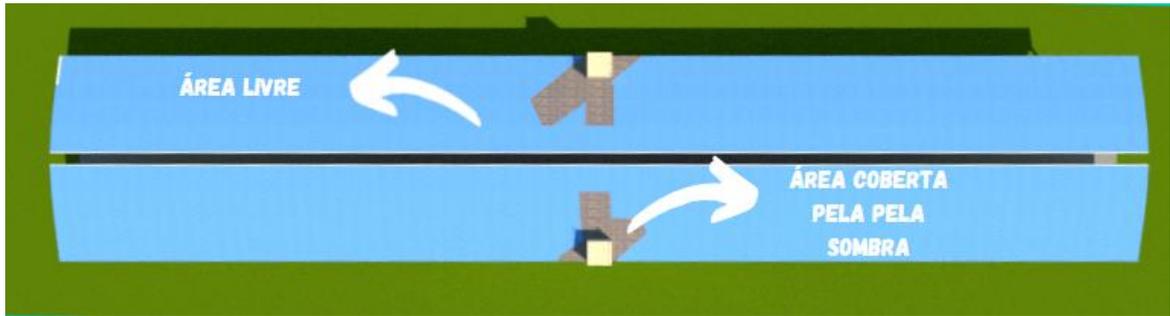
Figura 26 - Identificação das sombras na cobertura da estação pelo *SketchUp*.



Fonte: O próprio autor.

Utilizando o próprio *software* foi realizada a delimitação das áreas cobertas pela sombra nos horários e dias destacados. Com a cor azul foi marcada a área não sombreada, sendo esta a área disponível, com 2254,71 m². A figura 27 ilustra o resultado obtido.

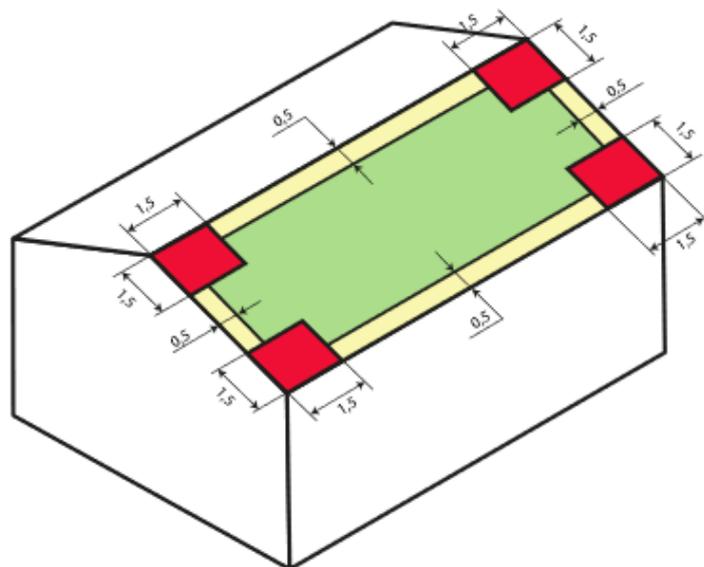
Figura 27 - Delimitação da área sombreada no *SketchUp*



Fonte: O próprio autor.

No entanto, como a delimitação das sombras não é linear para o formato dos módulos, foi realizada uma nova marcação, reduzindo a área útil, mas mantendo um formato mais apropriado. Foi também respeitada uma distância mínima de 0,5 m entre a extremidade do telhado e o início dos módulos FV e a distância de 1,5 m nos cantos das extremidades, assim como recomendado no Manual de Instalação de Estruturas para Painéis Fotovoltaicos da IBRAP, ilustrado na figura 28. Os valores determinados pelo manual derivam de cálculos realizados de acordo com a norma NBR-6123 e a norma ASCE-7-05, para inclinações de até 35° e edificações de até 18 metros (IBRAP, 2018).

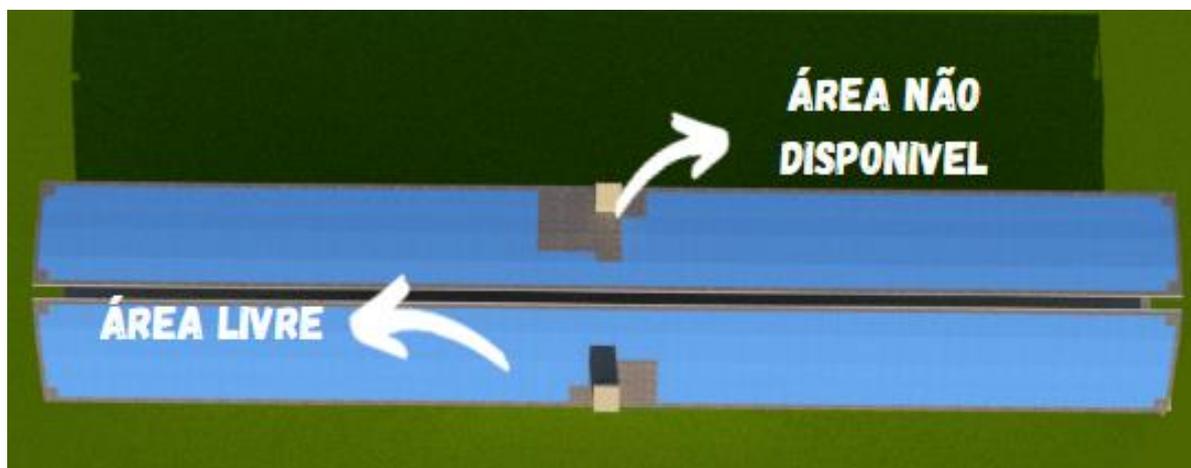
Figura 28 - Locais de fixação e recomendação de instalação do Manual de Instalação de Estruturas para Painéis Fotovoltaicos da IBRAP.



Fonte: (IBRAP, 2018)

A nova área livre delimitada pode ser representada pela figura 29, e possui uma área disponível de 1931,95 m².

Figura 29 - Delimitação da área disponível no *SketchUp*.



Fonte: O próprio autor.

Sendo assim, a área disponível para a instalação de módulos FV representa 81,40% da área total.

5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FV

5.1 Análise da fatura de energia elétrica da Estação JK

Na análise da fatura de energia da estação JK foram levadas em consideração todos os valores e dados obtidos no ano de 2019, de janeiro a dezembro deste ano. Assim como especificado no item 3.2, a estação é alimentada em média tensão de 13,8 kV e a demanda contratada ponta e fora ponta é de 35 kW.

Os dados referentes ao consumo ponta e fora ponta do período citado estão registrados na Tabela 2 e representados no gráfico 4.

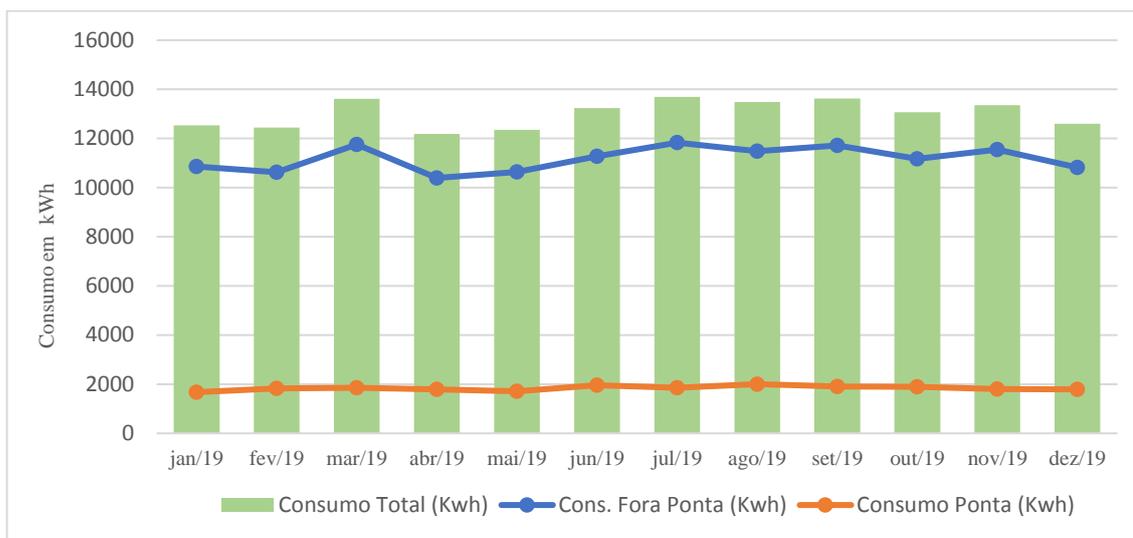
Tabela 2 -Registro do Consumo mensal da estação JK em 2019

Mês	Cons. Fora Ponta (kWh)	Consumo Ponta (kWh)	Consumo Total (kWh)
jan/19	10.861	1.675	12.536
fev/19	10.623	1.827	12.450
mar/19	11.762	1.857	13.619
abr/19	10.394	1.786	12.180
mai/19	10.644	1.709	12.353
jun/19	11.273	1.963	13.236
jul/19	11.831	1.856	13.687
ago/19	11.480	2.004	13.484
set/19	11.721	1.901	13.622
out/19	11.172	1.900	13.072
nov/19	11.553	1.797	13.350
dez/19	10.817	1.789	12.606
Consumo Anual (kWh)			156.195
Média Consumo mensal (kWh)/mês			13.016,25

Fonte: METROFOR – Fatura de Energia da Estação JK

A Média de Consumo Mensal é o valor dado pelo consumo anual de energia dividido pelo período de 12 meses, resultando no valor de 13.016,25 kWh/mês.

Gráfico 4 - Consumo ponta e fora ponta (kWh) da estação JK em 2019



Fonte: METROFOR – Fatura de Energia da Estação JK

5.2 Fator de Capacidade FV para Fortaleza

O fator de capacidade FV (FC_{FV}) é dado pela relação entre a geração de eletricidade efetiva e a geração nominal no mesmo intervalo de tempo. Para este projeto o valor foi obtido por meio de dados cedidos pelo Laboratório de Energias Alternativas (LEA) referentes às medições realizadas em 2018 em suas instalações na Universidade Federal do Ceará (UFC). Os dados estão registrados na tabela 3.

Tabela 3 - Registro do Fator de Capacidade no LEA

Mês	FC (%)
jan/18	17,3
fev/18	15,9
mar/18	19
abr/18	19,4
mai/18	18,6
jun/18	20,9
jul/18	21,1
ago/18	18,7
set/18	20,1
out/18	22,7
nov/18	20,2
dez/18	16,9
FC Médio	19,2

Fonte: Laboratório de Energias Alternativas -UFC

O fator de capacidade médio para o ano de análise foi de 19,2%.

Os módulos FV utilizados para as medições no LEA foram de silício policristalino de posicionamento fixo, dessa forma, será escolhido o modelo que corresponda às mesmas características.

5.3 Características do módulo FV

Utilizando o *RETScreen*, foi escolhido o modelo YL250P-29b, do fabricante Yingli Solar, mesmo modelo utilizado pelo LEA. A figura 30 mostra os valores obtidos pelo banco de dados do programa. A tabela 4 e a figura 31 contêm todos os dados obtidos pelo fabricante.

Figura 30 - Painel Escolhido – Aba de seleção do módulo no *RETScreen*..

Sistema: Eletricidade
 Tecnologia: Fotovoltaica
 Tipo: poly-Si

Faixa de capacidade: 0 kW para 1 kW

Fabricante: Yingli Solar
 Modelo: poly-Si - YL250P-29b

Capacidade por unidade: 250 W
 Número de unidades: 1
 Capacidade: 250 W

Eficiência: 15,4 %
 Perímetro: 1,623 m²

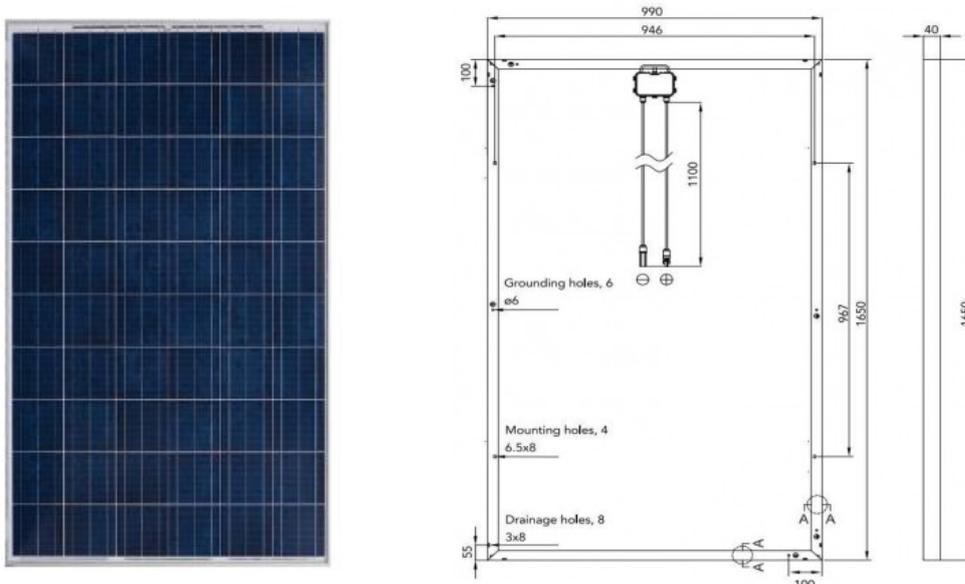
Fonte: RETScreen

Tabela 4 -Características do módulo da Yingli Solar de modelo YL250P-29b

Parâmetros	Valores
Máxima Potência (Pm):	250 W
Tolerância:	0 / 5 W
Voltagem de Máxima Potência (Vm) :	29,8 V
Corrente de Máxima Potência (Im):	8,39 A
Voltagem de Circuito Aberto (Voc):	37,6 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc):	8,92 A
Voltagem Máxima do Sistema:	1000 V
Eficiência do Painel:	15,4%
Dimensões	(1650 x 990 x 35) mm
Peso	19,1 kg

Fonte: Catálogo Yingli – YL250P-29b

Figura 31 - Dimensões do módulo da Yingli Solar de modelo YL250P-29b



Fonte: Catálogo Yingli – YL250P-29b

5.4 Dimensionamento do Sistema

Para a realização dos cálculos referentes ao dimensionamento do sistema, seguiu-se a linha de cálculos sugerida por (Carvalho, 2016) que leva em consideração os valores médios mensais e anuais do consumo, fator de capacidade FV e a potência do sistema.

5.4.1 Quantidade máxima de módulos FV

Inicialmente, determina-se a quantidade de módulos FV máxima ($Q_{max_{FV}}$) que pode ser alocada na área disponível, por meio da equação (1).

$$Q_{max_{FV}} = \frac{\text{área útil}}{\text{área unitária por painel}} \quad (1)$$

$$Q_{max_{FV}} = \frac{1931,95 \text{ m}^2}{1,623 \text{ m}^2} = 1190,35 \cong 1190 \text{ módulos}$$

Sendo assim, a quantidade máxima de módulos suportada na área determinada é de 1190.

5.4.2 Potência nominal do sistema

Logo em seguida é calculado o valor da potência nominal para suprir a energia elétrica que a estação consome de fato. Conhecendo o consumo anual da energia elétrica dado no item 5.1 (\mathcal{E}_{FV}) e o fator de capacidade calculado no item 5.2 (FC_{FV}), é possível determinar a potência nominal do sistema FV desejado ($Pot_{FV_{nominal}}$). Como a potência possui um referencial de tempo em horas, determinou-se T a quantidade de horas em um ano, que é de 8760 h. A equação (2) relaciona as todas grandezas.

$$FC_{FV} = \frac{\mathcal{E}_{FV}}{(Pot_{FV_{nominal}} \cdot T)} \quad (2)$$

$$0,192 = \frac{156.195 \text{ kWh}}{(Pot_{FV_{nominal}} \cdot 8760h)}$$

$$Pot_{FV_{nominal}} = 92,87 \text{ kW}$$

5.4.3 Quantidade de módulos FV

A equação (3) é utilizada para determinar a quantidade de módulos necessários ($Qtd_{modulos}$), relacionando a potência nominal do sistema FV e a potência nominal unitária de cada painel.

$$Qtd_{modulos} = \frac{\text{Potencia nominal FV}}{\text{Potencia unitária por painel}} \quad (3)$$

$$Qtd_{modulos} = \frac{92,87 \text{ kW}}{250 \text{ W}} = 371,48 \cong 372 \text{ módulos}$$

A quantidade de módulos necessária é menor que a quantidade máxima suportada, permitindo a viabilização do projeto.

A potência nominal e a eletricidade gerada anualmente pelo sistema são calculadas e estão registradas na tabela 5.

$$\text{Potência nominal FV} = 250 \text{ W} \times 372 \text{ módulos} = 93 \text{ kW}$$

$$\text{Energia nominal FV} = 0,192 \times 93 \text{ kW} \times 8760 \text{ h} = 156.418,56 \text{ kWh}$$

Tabela 5 - Valores dimensionados para os módulos FV

Nº de módulos	Potência nominal (kWp)	Eletricidade gerada (kWh/ano)	Área ocupada pelos painéis (m ²)
372	93 kW	156.418,56	603,75

Fonte: O próprio autor.

5.4.4 Inversor

O inversor a ser dimensionado será o responsável por converter a energia elétrica gerada pelos módulos de corrente CC à corrente CA, além de garantir a segurança do sistema. Para isso foi escolhido o inversor monofásico da marca PHB Solar, de modelo PHB5000D-NS que permite a instalação dos módulos FV com duas orientações diferentes e sistema de comunicação Wi-fi homologado. As características do inversor se encontram na tabela 6.

Tabela 6 - Características do inversor PHB5000D-NS

Parâmetros	Valores
Max. Potência FV [W]	6500
Max. Tensão CC [V]	580
Tensão CC de Partida [V]	120
Corrente CC Máxima [A]	11/11
Nº Strings / MPPT	2/2
Potência CA Nominal [W]	5000
Max. Potência CA [W]	5000
Max. Corrente CA [A]	22,8
Saída Nominal CA [Hz;Vca]	60; 220
Faixa de Operação CA [Hz;Vca]	57.5~62; 176~242
THD	<5%
Conexão CA	Monofásica / Bifásica
Fator de Potência	0.95 indutivo/0.95 capacitivo
Max. Eficiência	97.8%
Eficiência SPMP (MPPT)	>99.9%
Dimensões (L*A*P) [mm]	347*431*150
Peso Líquido [kg]	14

Fonte:(Catálogo PHB Solar – PHB5000D-NS)

Como é possível observar nos dados disponibilizados no catálogo, o inversor possui duas conexões Strings em paralelo, onde cada String será formada por um conjunto de módulos em série com corrente CC máxima de 11 A. Como o projeto utiliza apenas um modelo de módulo FV, ambas as conexões Strings serão iguais.

Logo em seguida, é calculada a quantidade de inversores necessária ($Qtd_{inversores}$) por meio da equação (4), que relaciona a potência nominal do sistema FV dimensionado ($Pot_{FV_{nominal}}$) e a potência máxima do inversor ($Pot_{INV_{max}}$).

$$Qtd_{inversores} = \frac{Pot_{FV_{nominal}}}{Pot_{INV_{max}}} \quad (4)$$

$$Qtd_{inversores} = \frac{93 \text{ kW}}{6500 \text{ W}} = 14,30 \cong 15 \text{ inversores}$$

Por meio da equação (5), é possível determinar o número de módulos por inversores ($Qtd_{mod/inv}$), relacionando ambas as grandezas.

$$Qtd_{mod/inv} = \frac{Qtd_{modulos}}{Qtd_{inversores}} \quad (5)$$

$$Qtd_{mod/inv} = \frac{372 \text{ modulos}}{15 \text{ inversores}} = 24,8 \cong 25 \text{ modulos/Inversor}$$

Assim sendo, serão acoplados 25 módulos por inversor, valor suportado por ele. Como cada inversor possui 2 Strings, cada conexão será acoplada a uma ligação em série de 12 e 13 módulos, respectivamente. Sendo assim, a tensão de cada conexão (V String) pode ser calculada pela equação (6), que relaciona a quantidade de módulos em série por String ($Qtd_{modulos/string}$), e a tensão de circuito aberto do módulo ($V \text{ módulo}$).

$$V \text{ String} = Qtd \text{ módulos/string} \times V \text{ módulo} \quad (6)$$

Para String com 12 conexões:

$$V \text{ String}_{12} = 12 \times 37,6 = 451,2 \text{ V}$$

Para String com 13 conexões:

$$V \text{ String}_{13} = 13 \times 37,6 = 488,8 \text{ V}$$

A corrente máxima de cada String (*Istring*) é determinada pela corrente de curto circuito do módulo (8,92 A).

Os valores obtidos se encontram resumidos na tabela 7.

Tabela 7 - Valores dimensionados para o Inversor

String	Quantidade de módulos	Tensão da String (V)	Corrente máxima da String (A)
1	12	451,2	8,92
2	13	488,8	8,92

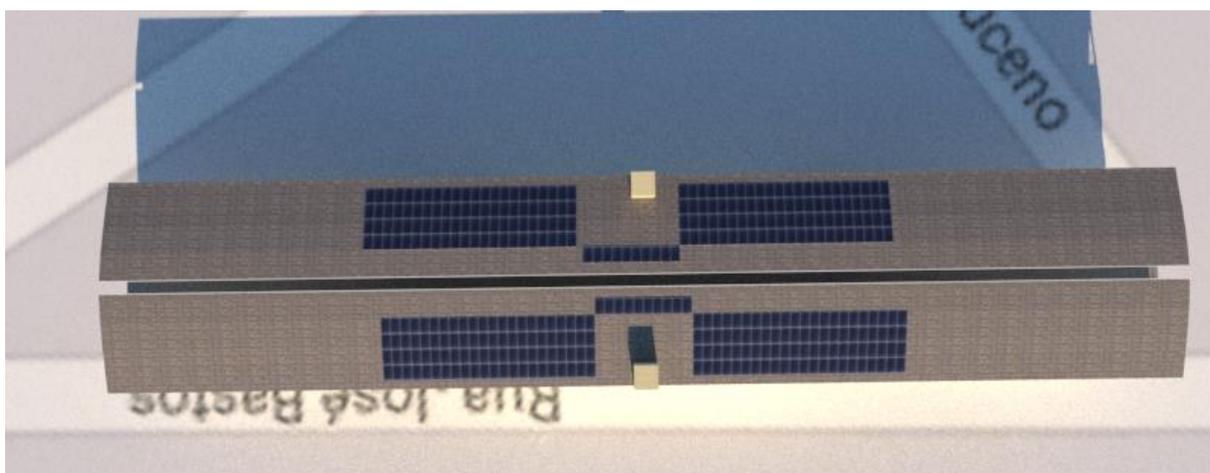
Fonte: O próprio autor.

Como no catálogo do inversor a máxima tensão por String é de 580 V e a corrente máxima por String é 11 A, os valores dimensionados respeitam os limites físicos do modelo.

5.4.5 Representação no SketchUp

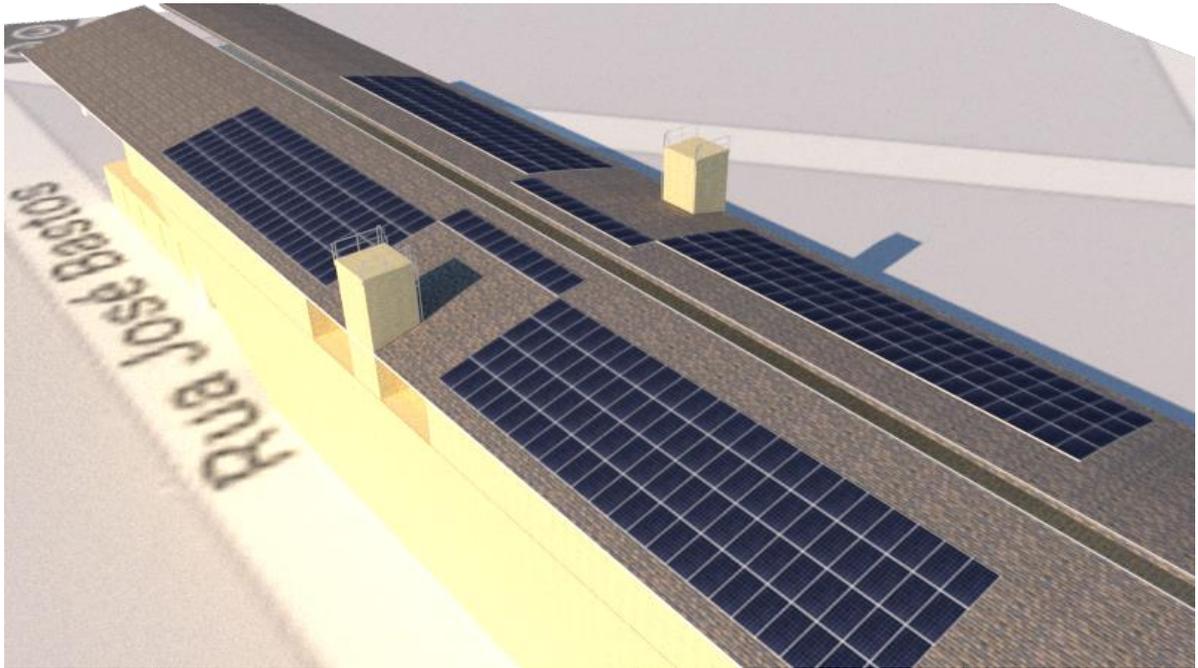
Foi feita a simulação da instalação dos módulos por meio do *software SketchUp*. As figuras 32 e 33 mostram as vistas superior e lateral da estação. Como a área ocupada pelos painéis é muito menor que a área disponível, a simulação foi feita alocando os módulos em áreas que não são sombreadas em qualquer hora do dia em ambas as datas escolhidas.

Figura 32 - Vista superior da estação – *SketchUp*.



Fonte: O próprio autor

Figura 33 - Vista lateral da estação – *SketchUp*.



Fonte: O próprio autor

6 ESTUDO DA VIABILIDADE DO PROJETO

6.1 Configurações Iniciais

Para realizar a análise financeira e o estudo da viabilidade do projeto é utilizado o *software RETScreen*, assim como mencionado no item 4.1.2.

Inicialmente são inseridos alguns dados referentes ao tipo do sistema, como produção de eletricidade e tipo de grid rede (central), assim como a localização da estação. O programa então retorna alguns dados iniciais referentes as características climáticas do local da instalação. As figuras 34 e 35 ilustram os resultados registrados.

Figura 34 - Informações iniciais da estação - *RETScreen*

Informação sobre o projeto		Veja banco de Dados do projeto
Nome do Projeto	Estação JK	
Localização do Projeto	Fortaleza	
Preparado para	METROFOR	
Preparado por	Caroline Carvalho	
Tipo de projeto	Produção de eletricidade	
Tecnologia	Fotovoltaica	
Tipo de grid	Rede Central	
Tipo de análise	Método 2	
Poder calorífico de referência	Poder calorífico superior (PCS)	
Ver parâmetros	<input checked="" type="checkbox"/>	
Idioma	Portuguese - Português	
Manual do usuário	English - Anglais	
Moeda	Brasil	
Unidades	Unidades métricas	

Condições de Referência do site	Selecionar local de dados climáticos
Localização dos dados climáticos	Fortaleza

Fonte: O próprio autor.

Figura 35 - Dados climáticos obtidos - RETScreen

Unidade	Localização dos dados climáticos		Localização do Projeto	
	'N	'E	'N	'E
Latitude	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8
Longitude	-38,6	-38,6	-38,6	-38,6
Elevação	m	26	m	26
Temperatura para projeto de aquecimento	°C	23,1	°C	23,1
Temperatura para projeto de refrigeração	°C	32,1	°C	32,1
Amplitude da Temperatura do Solo	°C	4,6	°C	4,6

Mês	Temperatura do Ar	Humidade relativa	Radiação solar diária - horizontal	Pressão Atmosférica	Velocidade do Vento	Temperatura do Solo	Graus-dia para aquecimento	Refrigeração graus-dias
	°C	%	kWh/m ² /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Janeiro	27,3	78,0%	5,33	101,2	3,7	27,8	0	536
Fevereiro	26,7	79,0%	5,14	101,2	3,1	27,9	0	468
Março	26,3	84,0%	4,67	101,2	2,6	27,9	0	505
Abril	26,5	85,0%	4,53	101,2	2,9	27,9	0	495
Mai	26,3	82,0%	5,03	101,3	3,7	27,7	0	505
Junho	25,9	80,0%	5,00	101,4	5,1	27,3	0	477
Julho	25,7	80,0%	5,69	101,5	5,6	27,3	0	487
Agosto	26,1	75,0%	6,19	101,5	6,3	28,1	0	499
Setembro	26,6	74,0%	6,25	101,4	6,7	28,4	0	498
Outubro	27,0	73,0%	6,47	101,3	6,3	28,8	0	527
Novembro	27,2	74,0%	6,36	101,2	5,8	28,7	0	516
Dezembro	27,3	76,0%	6,06	101,2	4,6	28,3	0	536
Anual	26,6	78,3%	5,56	101,3	4,7	28,0	0	6.050
Medido a	m				10,0	0,0		

Fonte: O próprio autor.

6.2 Modelo Energético

Neste item é necessário selecionar a tecnologia que será utilizada e o preço da eletricidade exportada. Para a configuração inicial é selecionado para o sistema FV o posicionamento fixo com uma inclinação de 15°, para garantir uma auto limpeza dos painéis, e o ângulo de azimute de 180°, visto que o projeto é realizado no hemisfério sul e a orientação deve ser direcionada ao norte geográfico.

Logo em seguida é necessário calcular o valor do preço da eletricidade exportada, que é determinada pela média da tarifa fora ponta, horário em que o sistema FV estará gerando energia. Os valores tarifários mensais ao longo do ano de 2019 obtidos nas contas de energia da estação são inseridos na tabela, e o programa retorna o preço médio de R\$ 298,62 por MWh, assim como pode ser visto na figura 36.

Figura 36 - Dados iniciais fornecidos sobre o sistema FV - *RETScreen*

Tipo de análise Método 1
 Método 2

Avaliação de recursos

Sistema de posicionamento solar Fixo

Inclinação 15,0

Azimut 180,0

Mostrar dado

Mês	Radiação solar diária - horizontal kWh/m ² /d	Radiação solar diária - inclinada kWh/m ² /d	Preço eletricidade exportada BRL/MWh	Eletricidade exportada p/ rede MWh
Janeiro	5,33	4,84	291,5	11,74
Fevereiro	5,14	4,84	294,0	10,66
Março	4,67	4,57	286,5	11,24
Abril	4,53	4,61	291,2	10,94
Mai	5,03	5,35	302,6	13,01
Junho	5,00	5,44	302,5	12,80
Julho	5,69	6,19	302,1	14,94
Agosto	6,19	6,50	315,3	15,61
Setembro	6,25	6,22	305,3	14,51
Outubro	6,47	6,11	292,1	14,69
Novembro	6,36	5,75	292,6	13,35
Dezembro	6,06	5,38	299,8	12,94
Anual	5,56	5,49	298,62	156,42

Radiação Solar anual - horizontal MWh/m² 2,03

Radiação Solar anual - inclinado MWh/m² 2,00

Fonte: O próprio autor.

Ainda nessa aba é necessário fornecer as informações referente aos módulos FV e aos inversores, com os dados dimensionados no item 5. No banco de dados do programa não há o modelo Yingli Solar YL250P-29b, então foi escolhido aquele que mais se assemelha às suas características.

Figura 37 - Configuração das tecnologias utilizadas - *RETScreen*

Fotovoltaica	
Tipo	poly-Si
Potência elétrica	93,00 kW
Fabricante	Yingli Solar
Modelo	poly-Si - YL250P-32b
Eficiência	15,4%
Temperatura de operação normal da célula	45 °C
Coefficiente de Temperatura	0,40% / °C
Área do coletor solar	604 m ²
Perdas diversas	3,6%
Inversor	
Eficiência	97,8%
Capacidade	97,5 kW
Perdas diversas	2,0%
Resumo	
Fator de Utilização	19,2%
Eletricidade exportada p/ rede	156,41 MWh

372 unidade(s)

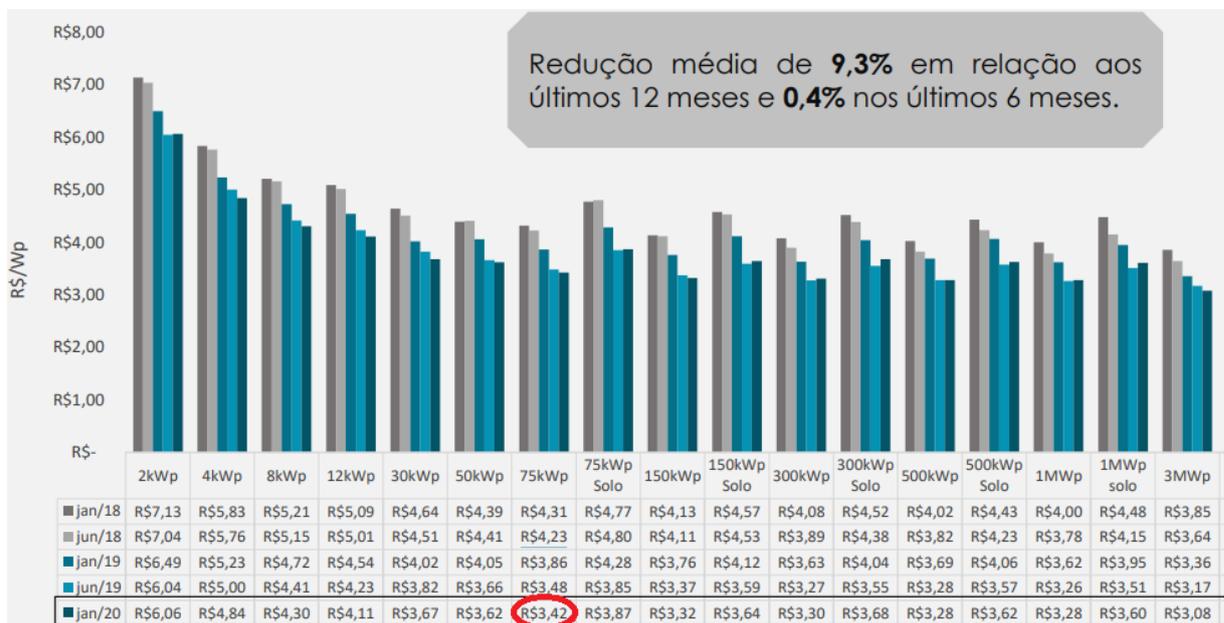
Fonte: O próprio autor.

Na figura 37 estão registrados os dados gerais fornecidos e obtidos. A eletricidade exportada pela rede é de 156.41 kWh, e o fator de utilização, que é equivalente ao fator de capacidade, é de 19,2% com uma área ocupada pelos módulos de 604 m². Os resultados encontrados correspondem aos valores calculados no item 5.

6.3 Análise de Custos

Para determinar o custo inicial do projeto é necessário encontrar o preço do kW no mercado de energia. A figura 38, disponibilizada pela Greener, apresenta os valores do Wp em relação à capacidade instalada do sistema. Foi escolhido o valor mais recente atualizado de janeiro de 2020 para a instalação de 75 kWp, valor mais próximo do dimensionado, sabendo que os dados disponibilizados incluem todas as etapas da instalação do sistema FV. O valor selecionado é de R\$ 3,42 por Wp (Greener, 2020).

Figura 38 - Custo de sistemas FV por faixa de potência



Fonte: (Greener, 2020)

De posse de tal valor, é possível calcular o custo inicial do projeto. A figura 39 mostra detalhes da aba de análise de custos.

Figura 39 - Análise de Custos - RETScreen

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
Estudo de viabilidade					
Estudo de viabilidade	custo			BRL	-
Subtotal				BRL	- 0,0%
Desenvolvimento					
Desenvolvimento	custo			BRL	-
Subtotal				BRL	- 0,0%
Engenharia					
Engenharia	custo			BRL	-
Subtotal				BRL	- 0,0%
Sistema de produção de eletricidade					
Fotovoltaica	kW	93,00	BRL 3.420	BRL	318.060
Construção de estrada	km			BRL	-
Linha de Transmissão	km			BRL	-
Subestação	projeto			BRL	-
Ações de Eficiência energética	projeto			BRL	-
Definido pelo usuário	custo			BRL	-
Subtotal				BRL	318.060 100,0%
Balanco do sistema e misc.					
Peças de reposição	%			BRL	-
Transporte	projeto			BRL	-
Treinamento & Comissionamento	d-p			BRL	-
Definido pelo usuário	custo			BRL	-
Contingências	%		BRL 318.060	BRL	-
Juros durante a construção			BRL 318.060	BRL	-
Subtotal				BRL	- 0,0%
Total de custos de investimento				BRL	318.060 100,0%

Fonte: O próprio autor.

O custo inicial é então de R\$ 318.060,00.

6.4 Análise de Emissões

Para calcular a equivalência da redução de CO₂ com o sistema FV proposto é necessário determinar o fator de emissão de CO₂, ou fator de emissão de GEE. Seu valor médio anual para o Brasil em 2019 foi registrado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia em Inovações e é igual a 0,0750 tCO₂ por MWh (MCTIC, 2019).

A figura 40 registra o valor em toneladas de CO₂ que deixaria de ser emitido, que é 11,7 tCO₂ por ano, o que corresponde a quase 12 créditos de carbono, visto que 1 crédito é igual 1 tonelada de CO₂ que deixa de ser emitida.

Figura 40 - Análise de Emissões - *RETScreen*

Análise da Redução das Emissões RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Análise de Emissões

Método 1
 Método 2
 Método 3

Sistema elétrico de referência (Baseline)

País - região	Tipo de Combustível	Fator de Emissão de GEE (excl. T&D) tCO ₂ /MWh	Perdas T&D %	Fator de emissão de GEE tCO ₂ /MWh
Brazil	Todos os tipos	0,075		0,075

Mudanças na linha de base durante projeto

Sumário dos GEE do caso de referência(Baseline)

Tipo de Combustível	Mix do combustível %	Consumo de combustível		Fator de emissão de GEE	Emissão de GEE
		MWh	tCO ₂ /MWh	tCO ₂	
Eletricidade	100,0%	156	0,075	11,7	
Total	100,0%	156	0,075	11,7	

Fonte: O próprio autor.

A figura 41 mostra um sistema de equivalências na quantidade de CO₂ que seria emitida em relação às toneladas de lixo reciclado, litros de gasolina não consumidos, veículos não utilizados e hectares de floresta absorvendo carbono.

Figura 41 - Equivalências na quantidade de CO₂ reduzida – *RETScreen Expert*



Fonte: O próprio autor.

6.5 Análise Financeira

Para obter os dados financeiros é necessário determinar alguns parâmetros. Inicialmente determina-se a taxa de inflação no ano de 2019, que é de 4,31% (Agência Brasil, 2020).

O segundo valor a ser preenchido é a taxa de desconto, que de acordo com (NAKABAYASHI, 2014) pode ser definida como a taxa SELIC, pois há títulos do tesouro nacional que possuem a rentabilidade vinculada a esta taxa. A taxa SELIC em 2019 foi de 4,75% a.a. (Agência Brasil, 2019). A vida do projeto foi determinada em 25 anos. A figura 42 mostra o preenchimento dos dados realizado no *RETScreen*. O programa realiza o arredondamento com apenas uma casa decimal.

Figura 42 - Preenchimento dos parâmetros financeiros – *RETScreen*

Parâmetros financeiros			
Geral			
Reajuste do custo do combustível	%		
Taxa de inflação	%	4,3%	
Taxa de desconto	%	4,8%	
Vida do projeto	ano	25	

Fonte: O próprio autor.

O último dado a ser inserido é a taxa de indexação sobre a eletricidade exportada, que é o reajuste tarifário da energia elétrica. Em 2019 no Ceará esse valor foi de 8,22% (Estado de Minas, 2019). A figura 43 mostra o preenchimento final dos dados e o resumo da eletricidade exportada.

Figura 43 - Dados - Receita anual – *RETScreen*

Receita anual			
Receita com eletricidade exportada			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		156
Preço eletricidade exportada	BRL/MWh		298,62
Receita com eletricidade exportada	BRL		46.696
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		8,2%

Fonte: O próprio autor.

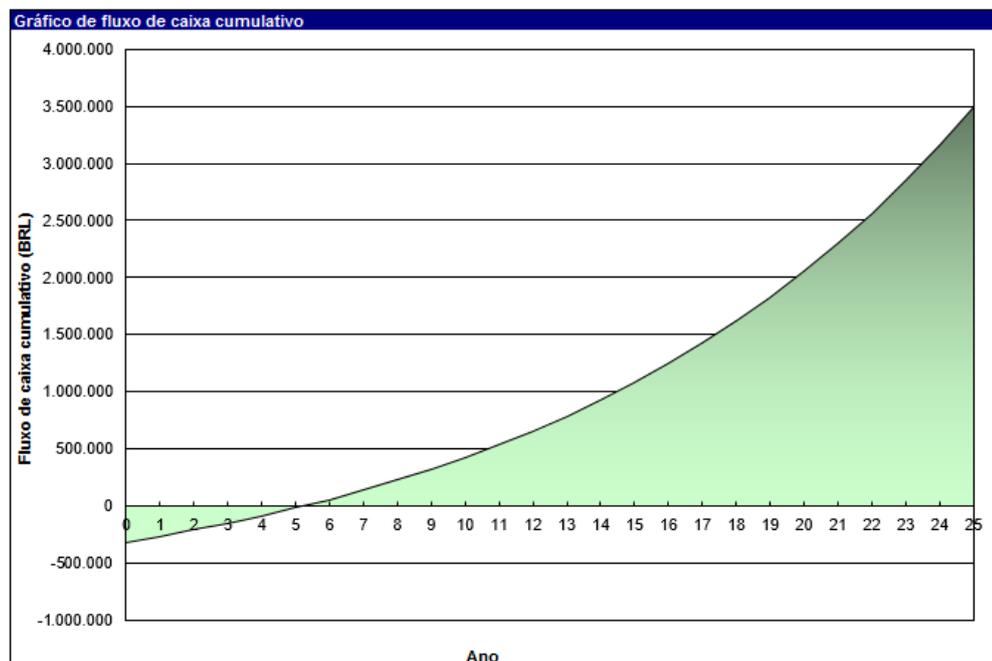
O programa calcula uma taxa interna de retorno (TIR) do projeto de 23,5% a.a. O retorno simples, ou *payback*, foi calculado com 6,8 anos com fluxo de caixa positivo (retorno do capital próprio) a partir de 5,3 anos e uma razão custo benefício (C-B) de 5,76. O VPL (valor presente líquido) foi retornado a R\$1.514.841,00. A redução líquida de GEE nos 25 anos previstos foi de 293 toneladas de CO₂. As figuras 44 e 45 trazem o resumo da viabilidade financeira e o fluxo de caixa acumulativo, respectivamente.

Figura 44 - Resumo viabilidade financeira – *RETScreen*

Viabil. Financeira		
TIR antes impostos-capital próprio	%	23,5%
TIR antes impostos - ativos	%	23,5%
TIR após impostos - capital	%	23,5%
TIR após impostos - ativos	%	23,5%
Retorno simples	ano	6,8
Retorno do capital próprio	ano	5,3
Valor Presente Líquido (VPL)	BRL	1.514.841
Economia anual no ciclo de vida	BRL/an	104.804
Razão custo benefício (C-B)		5,76
Custo da Geração de energia	BRL/MWh	51,82
Custo de Redução de GEE	BRL/CO ₂	(8.936)

Fonte: O próprio autor.

Figura 45 - Fluxo de caixa cumulativo – *RETScreen*



Fonte: O próprio autor.

7 CONCLUSÃO

De acordo com o estudo de caso realizado na estação JK foi concluída a viabilidade técnica e financeira do projeto de um sistema de GDFV no local. Com o auxílio do *software SketchUp*, na realização do estudo do sombreamento, foi determinada uma área livre disponível de 1931,95 m² para a instalação de painéis FV na cobertura da estação, valor que representa aproximadamente 82% da área total. A vantajosa disponibilidade de espaço, a localização geográfica da estação e a mínima interferência de sombreamento no local configuraram, então, ótimas condições para a realização do projeto.

O dimensionamento do sistema de 93kWp foi baseado por meio da análise das contas de energia da estação nos meses de janeiro a dezembro de 2019 e do fator de capacidade médio de 19,2%, cedido pelo LEA. Determinou-se a necessidade de 372 módulos de potência nominal unitária de 250 W e 15 inversores de 2 *Strings*, com potência máxima de 6500 W.

Com o auxílio do *software RETScreen* foi realizado o estudo de viabilidade financeira. Partindo do valor R\$ 3,42/Wp (Greener, 2020), o custo inicial do projeto foi fixado em R\$ 318.060,00, com uma taxa de retorno simples, ou *payback*, de 6,8 anos com fluxo de caixa positivo e retorno do capital próprio de 5,3 anos. O VPL calculado foi positivo, sugerindo a viabilidade do investimento, além de uma redução prevista de 293 toneladas de CO₂ emitidos em 25 anos, tempo de vida determinado para o projeto.

Em virtude de todos os dados expostos, conclui-se que a implementação do sistema de GDFV na estação JK é viável e apresenta grande potencial de geração e de economia nas contas de energia do Metrofor, podendo mesmo ser expandido para outras estações da linha.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como pode ser visto ao longo do trabalho, há uma grande disponibilidade de espaço na cobertura da estação em questão. O projeto proposto, dimensionado para suprir a energia consumida pela própria estação ocuparia aproximadamente 31,25% da área total disponível. Sendo assim, sugere-se a expansão do sistema com o espaço remanescente para o desconto da conta de energia de outras estações da linha.

Devido ao potencial do sistema comprovada, sugere-se também a implantação de mais sistemas de GDFV em demais estações, como a estação Paragangaba, que apresenta o mesmo projeto arquitetônica da estação JK.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil, Infográfico ABSOLAR**, 2020. Disponível em:

<<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>> Acessado em: 1 abril 2020.

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar. **Revisão das regras de GD deve ser concluída até março de 2021**, 2020. Disponível em:

<<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/revisao-das-regras-de-gd-deve-ser-concluida-ate-marco-de-2021.html>> Acessado em: 7 outubro 2020.

Agência Brasil. **Inflação oficial fecha 2019 em 4,31%**. Agência Brasil, 2020. Disponível em:

<[https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-01/inflacao-oficial-fecha-2019-em-431#:~:text=A%20infla%C3%A7%C3%A3o%20oficial%2C%20medida%20pelo,Geografia%20e%20Estat%C3%ADstica%20\(IBGE\)](https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-01/inflacao-oficial-fecha-2019-em-431#:~:text=A%20infla%C3%A7%C3%A3o%20oficial%2C%20medida%20pelo,Geografia%20e%20Estat%C3%ADstica%20(IBGE)>)> Acesso em: 21 julho 2020.

Agência Brasil. **Mercado financeiro reduz estimativa para inflação e taxa SELIC em 2019**

Agência Brasil, 2019. Disponível em:

<[https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-09/mercado-financeiro-reduz-estimativa-para-inflacao-e-taxa-selic-em-2019#:~:text=Para%20o%20mercado%20financeiro%2C%20a,2020%3A%205%25%20ao%20ano\)](https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-09/mercado-financeiro-reduz-estimativa-para-inflacao-e-taxa-selic-em-2019#:~:text=Para%20o%20mercado%20financeiro%2C%20a,2020%3A%205%25%20ao%20ano)>)> Acesso em: 21 julho 2020.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída: Sistema de compensação de energia elétrica**. 2. ed. Brasília: Aneel, 2016. 34 p.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482 de 17 de Abril de 2012**. Disponível em:<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> > Acesso em: 12 março 2020.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015**. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>

Acesso em: 12 março 2020.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Revisão das regras de geração distribuída entra em consulta pública**. [s.l.]: ANEEL, 15 out. 2019. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de-imprensa-exibicao> Acesso em: 12 março 2020.

BLUE SOL. **Geração Distribuída da ANEEL Avança com Energia Solar Fotovoltaica**.

[s.l.], 2 abril 2018. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/geracao-distribuida-da-aneel/>> Acesso em: 12 março 2020.

BNP – Banco do Nordeste. **Micro e minigeração distribuída**. Caderno Setorial ETENE. 2019. 17p. Disponível em:

<https://www.bnb.gov.br/documents/80223/5577175/87_Energia.pdf/4bc4d076-3e0a-ff60-373e-85ea020e585a> Acesso em: 5 abril 2020.

Brooklyn Eagle. **Coney Island station's pricy solar panels have been dark for 7 years. No one knows when they're coming back.** News, Coney Island. 2019. Disponível em: <<https://brooklyneagle.com/articles/2019/11/22/coneys-subway-solar-panels-went-dark-after-only-7-years-theyre-still-off-the-grid-today/>> Acesso em: 19 mar. 2020.

CARVALHO, Paulo Cesar Marques de. **Dimensionamento de planta FV conectada à rede elétrica.** Fortaleza: UFC, 2017. 18 slides, color.

CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar.** Gramado. CBENS, 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens>> Acesso em: 25 março 2020.

CII – Confederation of Indian Industry,. **Powering your rooftops 2019.** Hero Future Energies, New Delhi. 2019. Disponível em: <https://www.herofutureenergies.com/backend/web/uploads/images/1573299476Powering%20your%20Rooftops%202019%20Report_CII_HFE-final_compressed.pdf> Acesso em: 29 março 2020.

Daily Metro Rail. **Delhi metro starts receiving power from rewa mega solar power plant in madhya pradesh.** 2019. Disponível em: <http://www.delhimetrorail.com/press_reldetails.aspx?id=0ssoOzVvQnglld> Acesso em: 29 março 2020.

Estado de Minas. **Tarifas da ENEL Ceará terão aumento médio de 8,22%.** Estado de Minas Economia, 2019. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2019/04/16/internas_economia,1046779/tarifas-da-enel-ceara-terao-aumento-medio-de-8-22.shtml#:~:text=A%20Ag%C3%Aancia%20Nacional%20de%20Energia,11%2C62%25%20sugeridos%20inicialmente.> Acesso em: 21 julho 2020.

GLOBAL MARKET OUTLOOK. **Solar Power Europe's Global Market Outlook 2019 – 2023.** Solar Power Europe, 2019. Disponível em: <<https://resources.solarbusinesshub.com/images/reports/222.pdf>> Acesso em: 19 março 2020.

Governo de Brasília. **Energia solar no metrô.** 2017. Disponível em: <<http://www.brasilia.df.gov.br/energia-solar-no-metro/>> Acesso em: 29 mar. 2020.

GOUVEIA, Bárbara de Luca de Franciscis. **Análise técnica e econômica da implementação de um sistema fotovoltaico no modelo de uma árvore na faculdade de tecnologia da universidade de Brasília.** 2018. 10 p. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, CBENS 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/5/5>> Acesso em: 16 junho 2020.

GREENER. **Estudo estratégico: Mercado fotovoltaico de geração distribuída.** [s.l.], 4º trimestre, 2019. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/pesquisas-de-mercado/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-4o-trimestre-de-2019/>> Acesso em: 30 julho 2020.

IBRAP – Indústria Brasileira De Alumínio e Plásticos S/A. **Manual de Instalação de Estruturas para Painéis Fotovoltaicos**. 2018. Disponível em: <http://ibrap.com.br/wp-content/uploads/2018/09/Estrutura_Fixacao_Fotovoltaica.pdf> Acesso em: 17 jul. 2020.

IEA – International Energy Agency. **Solar Energy: Mapping the Road Ahead**. Technology Report, outubro 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-energy-mapping-the-road-ahead>> Acesso em: 20 março 2020.

IRENA – The International Renewable Energy Agency. **Turning the urban rail system green, New Delhi, India** Giz. 2018 Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Dec/IRENA_Cities_2018d_New-Delhi.pdf?la=en&hash=3AFEEC1C114171E22A1C21D8883F40525B56859A> Acesso em: 20 março 2020.

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Fator Médio – Inventários corporativos (tCO₂/MWh)**. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html> Acessado em: 28 julho 2020.

METROFOR. **Metrofor: Governo do Ceará entrega 19ª estação da Linha Sul**. 2017. Disponível em: <<https://www.metrofor.ce.gov.br/2017/05/15/metrofor-governo-do-ceara-entrega-19o-estacao-da-linha-sul/>> Acesso em: 2 junho 2020.

METRO DF. **Metrô inaugura segunda estação com captação de energia solar**. METRO DF, 2018. Disponível em: <<http://www.metro.df.gov.br/?p=40166>> Acesso em: 27 mar. 2020.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira**. Brasília: MME, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>> Acesso em: 21 março 2020.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, 2014.

NARUTO, Denise Tiekko. **Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2017. 97p. Monografia de Graduação - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10020290.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2020.

Yingli. **Catálogo Módulo Fotovoltaico**, 2016. Disponível em: <http://www.yinglisolar.com/static/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE60CEL_L%20SERIES%20%20BS-29b_35mm_US_EN_20170821_V04.pdf> Acesso em: 20 julho 2020.