



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

JADIR ARAÚJO DE OLIVEIRA JÚNIOR

ANÁLISE E CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA
DAS ÁREAS EM DESERTIFICAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ

FORTALEZA

2022

JADIR ARAÚJO DE OLIVEIRA JÚNIOR

ANÁLISE E CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA DAS
ÁREAS EM DESERTIFICAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz
Marcelo Antunes

Coorientador: Eng. Gabriel Marçal da
Cunha Pereira Carvalho

FORTALEZA

2022

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)

- O47a Oliveira Júnior, Jadir Araújo de.
Análise e cálculo do potencial de geração solar fotovoltaica das áreas em desertificação no estado do Ceará / Jadir Araújo de Oliveira Júnior. – 2022.
62 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.
Coorientação: Prof. Gabriel Marçal da Cunha Pereira Carvalho.
1. Energia solar. 2. Áreas em desertificação. 3. Potencial de geração. 4. Geração distribuída. 5. Governo do Estado do Ceará. I. Título.

CDD 621.3

JADIR ARAÚJO DE OLIVEIRA JÚNIOR

ANÁLISE E CÁLCULO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA DAS
ÁREAS EM DESERTIFICAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 10 de Fevereiro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo
Antunes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Gabriel Marçal da Cunha Pereira
Carvalho (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Adão Linhares Muniz
Secretário de Energia e Telecomunicações do Ceará

Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Junior
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

A Deus, por toda sua proteção, e à minha família, por toda confiança depositada em mim. Mãe e Pai, os cuidados, a presença e todas as conversas de apoio foram essenciais em minha trajetória, pois sempre senti que nenhum problema seria grande o suficiente para que não pudéssemos resolver.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar vida, por renovar minhas forças diante das dificuldades e aflições, por me abençoar com saúde, por me abençoar com uma família e uma companheira que me amam verdadeiramente e por me proteger de todo o do mal.

Aos meus pais Jadir e Salete, e a meu irmão Jader por estarem sempre presentes nos momentos felizes comemorando comigo e nos momentos tristes me consolando e me dando forças para seguir em frente. Agradeço também por sempre me apoiarem e acreditarem que eu sou capaz.

À minha namorada Luiza por sempre estar do meu lado e pela sua compreensão nos momentos difíceis. Agradeço também a sua família por todo o apoio que tem me dado nesses últimos anos e que tem sido essencial para progredir no caminho.

Aos meus amigos da faculdade por toda a ajuda nas disciplinas, por todos os momentos de diversão e por todo o crescimento pessoal e profissional que tivemos nesses últimos anos.

Ao meu Orientador Prof. Fernando Antunes e meu Coorientador Gabriel Marçal por toda a dedicação, paciência e apoio com o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Ao Movimento Empresa Júnior, por ter me proporcionado incríveis momentos de crescimento pessoal e profissional. Em particular, agradeço aos amigos que estiveram comigo durante minha passagem pela empresa júnior do curso de engenharia elétrica da UFC, a Tecsys Jr.

Ao time de Engenharia e Operações da Enel X, que me receberam tão bem no meu primeiro estágio e que me proporcionaram a oportunidade de amadurecer no âmbito profissional e pessoal.

Ao time de Risco da Fortbrasil por me apresentaram o universo de analytics, área a qual me identifico muito e por toda a confiança já depositada no meu trabalho.

“A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

A geração de energia elétrica a partir da energia solar vem crescendo desde 2012 e sua participação na matriz elétrica brasileira tem aumentado de forma exponencial. Além disso, a geração distribuída tem se tornado uma excelente alternativa para promover a redução de gastos com energia elétrica. Para maximizar os ganhos com esta modalidade, deve-se utilizar locais que não possuem um aproveitamento econômico atrelado, como os telhados e áreas não agricultáveis. Nesse contexto, o Ceará apresenta mais de 16,6 mil km² em áreas em desertificação no seu território que se tornaram uma perda potencial de recursos financeiros e sociais para o estado. Tendo em vista os pontos apresentados, este trabalho apresenta uma análise do potencial das áreas em desertificação do Ceará para uso da energia solar na produção de energia elétrica e propõem o uso desta energia elétrica para abater o consumo das unidades consumidoras do Grupo B do Governo do Estado do Ceará. Para o estudo, utilizou-se a linguagem de programação *python* e dados georreferenciados para cálculo do potencial de geração de energia elétrica das áreas em desertificação. Encontrou-se um potencial de produção de energia elétrica de 230 TWh/ano. Considerando o consumo das unidades consumidoras de baixa tensão do Governo do Estado do Ceará o projeto proposto apresentou um *payback* inferior a 4 anos, totalizando uma economia de 1,6 bilhão de reais em 30 anos após a instalação do projeto.

Palavras-chave: Energia solar. Geração distribuída. Áreas em desertificação. Potencial de geração. Governo do Estado do Ceará. *Python*.

ABSTRACT

The generation of electricity from solar energy has been growing since 2012 and its participation in the Brazilian electricity matrix has increased exponentially. In addition, distributed generation has become an excellent alternative to promote the reduction of expenses with electricity. To maximize the gains with this modality, one should use places that aren't used for economic activities attached, such as rooftops and non-agricultural areas. In this context, Ceará presents more than 16.6 thousand km² of desertification areas in its territory that have become a potential loss of financial and social resources for the state. Bearing in mind the points presented, this work presents an analysis of the potential of the areas in desertification in Ceará for the use of solar energy in the production of electric energy and proposes the use of this electric energy to reduce the consumption of the consumer units of Group B of the Government of the State of Ceará. For the study, the python programming language and georeferenced data were used to calculate the electric energy generation potential of the desertification areas. It was found an electric energy production potential of 230 TWh/year. Considering the consumption of the low voltage consumer units of the Government of the State of Ceará the proposed project presented a payback time of less than 4 years, totaling a savings of 1.6 billion reais in 30 years after the installation of the project.

Keywords: Solar energy. Distributed generation. Areas in desertification. Generation potential. Government of the State of Ceará. Python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz primária de eletricidade brasileira em 2011	17
Figura 2 – Matriz primária de eletricidade brasileira em 2020	18
Figura 3 – Métodos de aproveitamento da energia solar	27
Figura 4 – Esquema do funcionamento de uma célula fotovoltaica	28
Figura 5 – Módulo fotovoltaico	29
Figura 6 – Influência da irradiância na Curva IV	30
Figura 7 – Influência da temperatura na Curva IV	31
Figura 8 – Composição de um <i>DataFrame</i> no GeoPandas	39
Figura 9 – Exemplo de mapa criado utilizando <i>Folium</i>	43
Figura 10 – Perfil de consumo das unidade consumidora (UC)'s do grupo B do Governo do Estado do Ceará	44
Figura 11 – Previsão de consumo e consumo médio das UC's do grupo B do Governo do Estado do Ceará	46
Figura 12 – Representação das linha de distribuição de média tensão (LDMT) do estado do Ceará	48
Figura 13 – Intercessão entre as LDMT e as Áreas em Desertificação (AEDs) do estado do Ceará	49
Figura 14 – Mapa interativo do Ceará	52
Figura 15 – Exemplo de <i>pop-up</i> no mapa interativo	52
Figura 16 – Resultado da análise de <i>Payback</i> simples	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Forma de conexão Enel Distribuição Ceará	34
Tabela 2 – Variáveis para cálculo de área	46
Tabela 3 – Categorização dos municípios para implementação do projeto	50
Tabela 4 – Ranking das microrregiões de planejamento do estado do Ceará	51
Tabela 5 – Custo de implementação das usinas	53
Tabela 6 – Resultado da análise de <i>Payback</i> simples	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEDs	Áreas em Desertificação
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASDs	Áreas Suscetíveis à Desertificação
COC	Custo de Oportunidade do Capital
csv	valores separados por vírgulas
ETL	<i>Extract, transform, load</i>
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GD	Geração Distribuída
HFP	hora fora ponta
HP	hora ponta
html	<i>HyperText Markup Language</i>
LDMT	linha de distribuição de média tensão
ONU	Organização das Nações Unidas
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura
shp	Shapefile
TIR	Taxa Interna de Retorno
UC	unidade consumidora
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>%</i>	Porcentagem
<i>A</i>	Amperes
<i>a.a</i>	ao ano
<i>CA</i>	Corrente alternada
<i>CC</i>	Corrente contínua
<i>GrupoB</i>	Grupo de unidades consumidoras atendidas em baixa tensão
<i>Fu</i>	Fator de uso do terreno
<i>GWh</i>	Gigawatt-hora
<i>GWp</i>	Gigawatt-pico
<i>ICMS</i>	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
<i>km</i>	Quilômetro
<i>km²</i>	Quilômetro quadrado
<i>kV</i>	Quilovolt
<i>kVA</i>	Quilovolt-ampere
<i>kW</i>	Quilowatt
<i>kW/m²</i>	Quilowatt por metro quadrado
<i>kWh</i>	Quilowatt-hora
<i>kWp</i>	Quilowatt-pico
<i>m</i>	Metro
<i>m²</i>	Metro quadrado
<i>MW</i>	Megawatt
<i>MWp</i>	Megawatt-pico
<i>PROCEL</i>	Programa de Conservação de Energia Elétrica
<i>R\$</i>	Real
<i>t</i>	Tempo
<i>TWh</i>	Terawatts-hora

V	Volts
W/m^2	Watt por metro quadrado
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	19
1.2	Estrutura do trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO E DEFINIÇÕES	21
2.1	Estrutura da tarifação	21
2.1.1	<i>Classificação do consumidor</i>	21
2.1.2	<i>Posto horário</i>	22
2.1.2.1	<i>Horário ponta</i>	22
2.1.2.2	<i>Horário intermediário</i>	22
2.1.2.3	<i>Horário fora de ponta</i>	22
2.1.3	<i>Modalidade tarifária</i>	23
2.1.3.1	<i>Monômia</i>	23
2.1.3.2	<i>Binômia</i>	23
2.2	Métodos de tarifação	23
2.2.1	<i>Tarifa convencional</i>	24
2.2.2	<i>Tarifa horosazonal branca</i>	24
2.2.3	<i>Tarifa horosazonal verde</i>	24
2.2.4	<i>Tarifa horosazonal azul</i>	25
2.3	Energia Solar	27
2.3.1	<i>Célula fotovoltaica</i>	27
2.3.1.1	<i>Célula fotovoltaica de sílcio monocristalino</i>	28
2.3.1.2	<i>Célula fotovoltaica de sílcio policristalino</i>	29
2.3.2	<i>Módulo fotovoltaico</i>	29
2.3.3	<i>Influência da irradiância e da temperatura</i>	30
2.3.4	<i>Influência do sombreamento</i>	31
2.4	Geração solar fotovoltaica	32
2.4.1	<i>Geração solar centralizada</i>	32
2.4.2	<i>Geração solar distribuída</i>	32
2.4.3	<i>Regulamentação nacional</i>	32
2.4.4	<i>Regulamentação distribuidora local</i>	33

2.5	Áreas suscetíveis a desertificação	34
2.5.1	Áreas Suscetíveis à Desertificação (ASDs) no Brasil	34
2.5.2	ASDs no Ceará	34
2.5.3	Aspectos socioeconômicos nas ASDs	35
2.5.4	Aspectos físicos nas ASDs	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	Introdução	36
3.2	Processo de aquisição de dados	36
3.2.1	<i>Extract, transform, load (ETL)</i>	36
3.2.2	<i>Extração</i>	37
3.2.3	<i>Transformação</i>	38
3.3	Manipulação de dados georreferenciados	38
3.3.1	<i>GeoPandas</i>	38
3.3.2	<i>Tipos de dados georreferenciados</i>	39
3.3.3	<i>Projeção de dados georreferenciados</i>	39
3.3.4	<i>Intercessão entre dados</i>	40
3.4	Definição do potencial de geração	40
3.4.1	<i>Módulo fotovoltaico</i>	41
3.4.2	<i>Fator de ocupação</i>	42
3.4.3	<i>Fator de uso do terreno</i>	42
3.4.4	<i>Perdas elétricas</i>	42
3.5	Criação de um mapa interativo	43
3.6	Definição do consumo de energia das UC's do grupo B do Governo do Estado do Ceará	43
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	45
4.1	Definição da área necessária	45
4.1.1	<i>Consumo mensal</i>	45
4.1.2	<i>Cálculo da área necessária</i>	46
4.2	Potencial de geração solar	47
4.3	Ranking de geração	47
4.3.1	<i>Extensão das LDMT nas AEDs</i>	48
4.3.2	<i>10 melhores municípios para implementação</i>	49

4.3.3	<i>Ranking das microrregiões de planejamento do estado do Ceará</i>	50
4.4	Mapa interativo	51
4.5	Gastos de implementação	53
4.6	Análise financeira	53
4.6.1	<i>Payback simples</i>	54
4.6.2	<i>Taxa Interna de Retorno (TIR)</i>	56
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	59
	ANEXOS	61
	ANEXO A-DATASHEET - MÓDULO SOLAR	62

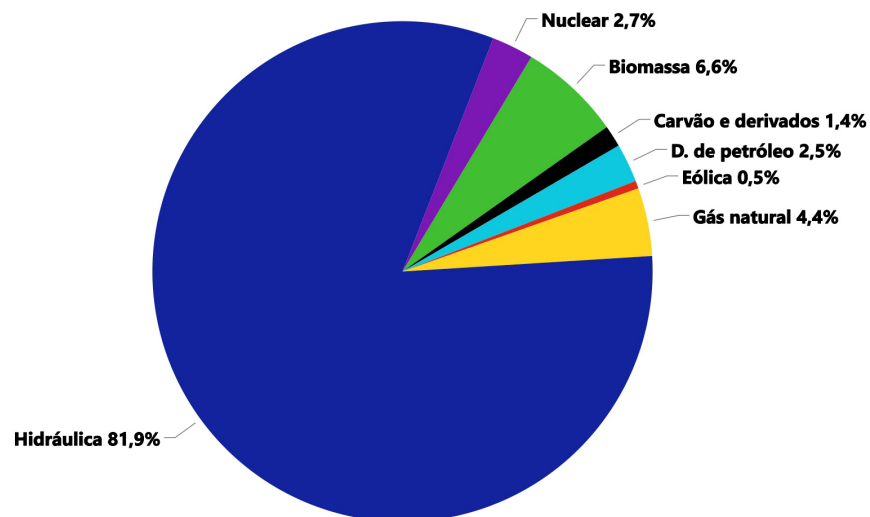
1 INTRODUÇÃO

O primeiro uso de um módulo fotovoltaico foi na década de 50, apesar da descoberta do efeito fotovoltaico ocorrer na metade do século XIX, utilizado para alimentar o rádio de um satélite. Desde então, essa tecnologia tem se desenvolvido de forma surpreendente e começou a ser utilizada em ambientes domésticos, industriais e até em meios de locomoção (PORTALSOLAR, 2016b).

No Brasil, a energia solar demorou a ser utilizada, sendo a primeira usina solar instalada somente no ano 2011, com localização no sertão do Ceará. A partir deste momento, a geração solar fotovoltaica tem crescido cada vez mais ao longo dos anos e tende a ocupar um importante lugar na matriz elétrica brasileira (PORTALSOLAR, 2020).

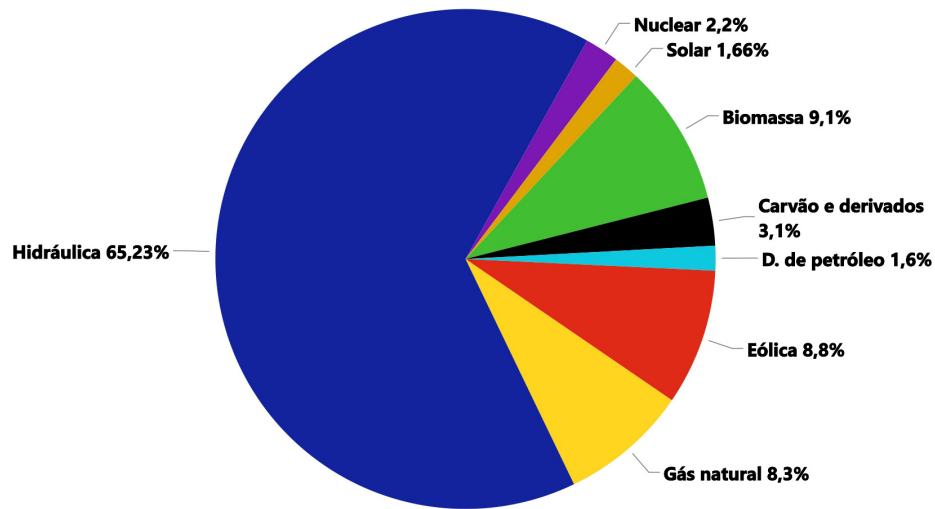
A matriz primária de eletricidade é um conjunto de fontes de energia utilizadas para a produção de energia elétrica (CLARKE, 2020). Tendo este conhecimento, pode-se analisar as Figuras 1 e 2, onde são demonstradas a representatividade de cada fonte de energia na matriz elétrica brasileira no ano de 2011 e no ano de 2020, respectivamente.

Figura 1 – Matriz primária de eletricidade brasileira em 2011



Fonte: Adaptado de (EPE, 2012)

Figura 2 – Matriz primária de eletricidade brasileira em 2020



Fonte: Adaptado de (EPE, 2020c)

Percebe-se que a fonte solar não apresentava relevância na matriz primária de eletricidade e em pouco tempo já começou a ser mais expressiva que fontes já consolidadas no mercado. Tal fato reforça ainda mais a importância que essa energia está tendo e vai ter nos próximos anos. Entretanto, vale salientar que a geração distribuída não é contabilizada na matriz primária de eletricidade.

Se tratando de grandes gerações de energia solar fotovoltaica, geralmente, é necessário que haja um grande espaço disponível com características ideais para geração. Desse modo, é destacável que se a usina a ser instalada for de grande porte, possivelmente os telhados dos prédios não serão por si só suficientes para comportar a instalação (PORTALSOLAR, 2016a).

Devido ao clima semiárido e as mudanças climáticas que estão ocorrendo, uma parcela da região nordeste está suscetível ao processo de desertificação. Em especial, o estado do Ceará que apresenta 100% de seu território dentro das Áreas Suscetíveis à Desertificação (ASDs) (COSTA, 2020).

As áreas desertificadas, se tornam locais de baixo aproveitamento econômico, visto que não são locais propícios para a maioria dos empreendimentos de valor. Com isso, o Ceará tende a ter grandes extensões de terra que não estarão agregando renda ao estado (COSTA, 2020).

Diante do exposto, o intuito deste trabalho é fazer um estudo da usabilidade das

ASDs para a geração solar fotovoltaica, assim como o seu potencial de geração.

1.1 Objetivos

O objetivo desse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é analisar as áreas em desertificação do estado do Ceará e quantificar o potencial de energia solar das áreas em desertificação do Ceará com a finalidade de abastecer as unidades consumidoras do Grupo B do Governo do Estado do Ceará.

Objetiva-se a elaboração de um painel que possa entregar os seguintes resultados:

- Mapear as áreas de desertificação do Estado do Ceará;
- Mapear as linhas de escoamento de energia e irradiação solar;
- Realizar uma previsão de geração anual;
- Realizar uma previsão de consumo para um ano em específico;
- Realizar uma comparação entre o consumo esperado e a geração estimada; e
- Estimar o custo de implementação e o retorno financeiro.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

No primeiro capítulo, é apresentada uma ideia geral do tema abordado, os objetivos traçados e a estrutura em que o trabalho foi organizado.

O Capítulo 2 traz uma revisão dos termos e definições da estrutura tarifária do setor elétrico, da energia solar, da conversão solar fotovoltaica e do processo de desertificação.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia do trabalho. Neste capítulo, será demonstrada as etapas de aquisição e tratamento de dados, equacionamento do potencial de geração solar e criação do mapa interativo.

No Capítulo 4, é apresentado os resultados do trabalho: o potencial de geração das áreas em desertificação, o mapa interativo e a análise econômica da implementação desta geração.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do estudo feito e as sugestões de trabalhos futuros que possam agregar na linha de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO E DEFINIÇÕES

Neste capítulo serão abordados definições e conceitos dos aspectos do sistema tarifário brasileiro, da energia solar, da geração solar e da áreas suscetíveis a desertificação.

2.1 Estrutura da tarifação

O método da tarifação de energia elétrica no Brasil considera diversos fatores técnicos para o cálculo da fatura mensal de uma unidade consumidora. Estes fatores são:

- Classificação do consumidor;
- Posto Horário;e
- Modalidade tarifárias.

2.1.1 *Classificação do consumidor*

As unidades consumidoras são divididas em dois grupos, o Grupo A (unidades atendidas com tensão superior a 2,3kV) e o Grupo B (unidades atendidas com tensão inferior a 2,3kV), sendo este o foco de estudo desse trabalho. Esses grupos podem ser subdivididos conforme a atividade de consumo e tensão de atendimento (ANEEL, 2012).

Segundo o Manual de Tarifação de Energia Elétrica (PROCEL, 2002): O Grupo B é dividido em subgrupos, de acordo com a atividade do consumidor, conforme apresentados a seguir:

- Subgrupo B1 – residencial e residencial baixa renda;
- Subgrupo B2 – rural e cooperativa de eletrificação rural;
- Subgrupo B3 – demais classes;
- Subgrupo B4 – iluminação pública.

Os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2300 volts, como indústrias, shopping centers e alguns edifícios comerciais, são classificados no Grupo A. Esse grupo é subdividido segundo a tensão de atendimento, como mostrado a seguir:

- Subgrupo A1 para o nível de tensão de 230 kV ou superior;
- Subgrupo A2 para o nível de tensão de 88 a 138 kV;
- Subgrupo A3 para o nível de tensão de 69 kV;
- Subgrupo A3a para o nível de tensão de 30 a 44 kV;
- Subgrupo A4 para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV;

- Subgrupo AS para sistema subterrâneo.

2.1.2 Posto horário

O posto horário é uma faixa de horário definida pela distribuidora a qual a unidade consumidora é cliente, no seu processo de revisão tarifária periódica. É utilizada para fazer o faturamento, a contratação de energia e a demanda de energia elétrica. Por meio dessa faixa, o consumidor consegue ser beneficiado com tarifas mais baixas ao utilizar energia em horário em que o sistema elétrico está com baixa demanda (Hora fora ponta) e, por outro lado, ser taxado com tarifas mais altas ao utilizar em horários de maior demanda do sistema elétrico (hora ponta) ou em horários próximos a este (hora intermediária).

Nas modalidades tarifárias do Grupo A, aplicam-se os postos hora ponta (HP) e hora fora ponta (HFP) e na Tarifa Branca aplicada ao Grupo B, aplicam-se os três postos tarifários: ponta, intermediário e fora ponta (ANEEL, 2015b).

2.1.2.1 Horário ponta

É a faixa de horário de 3h consecutivas, com exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais, definido pela concessionária. Neste horário, as tarifas de energia possuem um preço mais elevado para consumidores do grupo A e do grupo B que optaram pela Tarifa Branca, o valor da tarifa, geralmente, é três vezes a tarifa no horário fora ponta.

2.1.2.2 Horário intermediário

Período de horas conjugadas ao horário de ponta, podendo variar de 1h até 1h30 antes e depois do horário de ponta. Neste horário, as tarifas de energia possuem um preço mais baixo que as do horário de ponta e mais alto que do horário fora ponta e somente é aplicado aos consumidores do grupo B que optaram pela Tarifa Branca.

2.1.2.3 Horário fora de ponta

Período diário composto pelas horas consecutivas e complementares ao horário de ponta e intermediário. Caso o cliente não se enquadre em uma modalidade que possua horário intermediário ou horário de ponta, este será o único posto tarifário a ser considerado.

2.1.3 Modalidade tarifária

A energia elétrica tornou-se um bem indispensável para o dia a dia da sociedade, sendo utilizado nas residências, comércios, indústrias e os demais segmentos da economia. Dessa forma, para o uso desse bem é necessária a aplicação de tarifas que remunerem o serviço de forma adequada, que viabilize a estrutura para manter o serviço com qualidade e crie incentivos para eficiência. Seguindo tais preceitos, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolve metodologias de cálculo tarifário para segmentos do setor elétrico (geração, transmissão, distribuição e comercialização), considerando fatores como a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição, bem como fatores econômicos de incentivos à modicidade tarifária e sinalização ao mercado (ANEEL, 2016).

2.1.3.1 Monômia

Tarifa constituída por um único fator monetário, sendo este o consumo de energia elétrica ativa. Esta tarifa é a mais simples de ser utilizada, já que considera somente o consumo elétrico no período definido. Esta tarifa é mais empregada nos consumidores do grupo B (ANEEL, 2016).

2.1.3.2 Binômia

Tarifa constituída por dois fatores monetários, sendo um o consumo de energia elétrica ativa e outro a demanda faturável. Diferente da monômia, esta tarifa se torna um pouco mais complexa para calcular a fatura e só pode ser empregada nos consumidores do grupo A (ANEEL, 2016).

2.2 Métodos de tarifação

De acordo com as premissas da distribuidora de energia, cada unidade consumidora possui um método de tarifação que leva em conta seu perfil de atuação, consumo mensal e tensão de atendimento.

2.2.1 *Tarifa convencional*

Tarifa única de consumo de energia elétrica cobrada aos consumidores do grupo B que não optaram pela Tarifa Branca, nesta modalidade não existe contratação de demanda, sendo considerado somente o consumo elétrico independente do horário do dia (ANEEL, 2016), conforme mostrado na equação abaixo:

$$\text{Consumo Faturado (R\$)} = \text{Tarifa(R\$/kW)} * \text{Consumo(kW)}_{\text{Registrado}}$$

2.2.2 *Tarifa horosazonal branca*

Tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, conforme as horas de utilização do dia (postos tarifários), utilizada apenas pelos consumidores do grupo B que optaram por esta categoria. Não está disponível para o subgrupo B4 e para a subclasse Baixa Renda do subgrupo B1(ANEEL, 2016). O consumo faturado fica conforme a equação abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Consumo Faturado (R\$)} = & \\ & \text{Tarifa(R\$/kW)}_{\text{horaforaponta(HFP)}} * \text{Consumo(kW)}_{\text{Registrado-HFP}} + \\ & \text{Tarifa(R\$/kW)}_{\text{intermedirio}} * \text{Consumo(kW)}_{\text{Registrado-intermedirio}} + \\ & \text{Tarifa(R\$/kW)}_{\text{horaponta(HP)}} * \text{Consumo(kW)}_{\text{Registrado-HP}} \end{aligned}$$

2.2.3 *Tarifa horosazonal verde*

Tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia (postos tarifários), e de uma única tarifa de demanda de potência. Disponível para os consumidores do grupo A pertencente aos subgrupos A3a, A4 e AS (ANEEL, 2016). O consumo faturado fica conforme a equação abaixo:

Consumo Faturado (R\$) =

$$\begin{aligned} & \textit{Tarifa}(\text{R\$/kW})_{\textit{HFP}} * \textit{Consumo}(\text{kW})_{\textit{Registrado-HFP}} + \\ & \textit{Tarifa}(\text{R\$/kW})_{\textit{HP}} * \textit{Consumo}(\text{kW})_{\textit{Registrado-HP}} \end{aligned}$$

Além do consumo elétrico, a demanda elétrica também é considerada na fatura sendo que, neste caso, não é levado em conta o posto tarifário vigente. Esta demanda utilizada pode ser a contratada ou a demanda medida, considerada para o cálculo a maior entre às duas. Além disso, há uma tolerância de 5% da demanda medida sobre a contratada (ANEEL, 2016). A demanda faturada para os casos onde demanda contratada for maior que a medida segue a equação abaixo:

$$\textit{Demanda Faturada (R\$)} = \textit{Tarifa}(\text{R\$/kW})_{\textit{Demanda}} * \textit{Demanda}(\text{kW})_{\textit{Contratada}}$$

Caso a demanda medida, ultrapasse o valor de tolerância da demanda contratada, será cobrado uma multa de ultrapassagem, onde a tarifa será o dobro da tarifa de demanda e a demanda para o cálculo será a diferença entre a contratada e a medida, conforme equação abaixo.

Demanda Ultrapassada (R\$) =

$$\begin{aligned} & 2 * \textit{Tarifa}(\text{R\$/kW})_{\textit{Demanda}} * \\ & (\textit{Demanda}(\text{kW})_{\textit{Registrada}} - \textit{Demanda}(\text{kW})_{\textit{Contratada}}) \end{aligned}$$

2.2.4 Tarifa horosazonal azul

Tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia (postos tarifários). Disponibilizada para todos os subgrupos do grupo A (ANEEL, 2016). O cálculo do consumo faturado e da demanda faturada segue a mesma lógica utilizada para a tarifa horosazonal verde, diferenciando-se que o posto tarifário vai ser considerado para ambos os cálculos e não somente para o consumo. As equações estão descritas abaixo.

Consumo Faturado (R\$) =

$$Tarefa(R\$/kW)_{HFP} * Consumo(kW)_{Registrado-HFP} +$$

$$Tarefa(R\$/kW)_{HP} * Consumo(kW)_{Registrado-HP}$$

Demanda Faturada (R\$) =

$$Tarefa(R\$/kW)_{Demanda-HFP} * Demanda(kW)_{Registrado-HFP} +$$

$$Tarefa(R\$/kW)_{Demanda-HP} * Demanda(kW)_{Registrado-HP}$$

Demanda Ultrapassada (R\$) =

$$2 * Tarefa(R\$/kW)_{Demanda-HP} *$$

$$(Demanda(kW)_{Registrada-HP} - Demanda(kW)_{Contratada-HP}) +$$

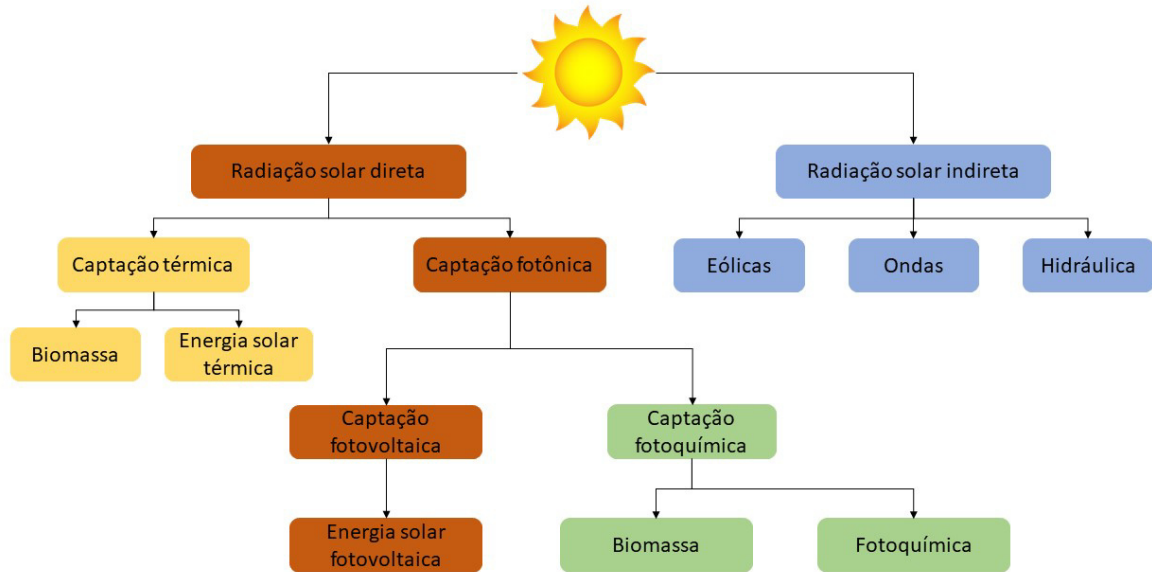
$$2 * Tarefa(R\$/kW)_{Demanda-HFP} *$$

$$(Demanda(kW)_{Registrada-HFP} - Demanda(kW)_{Contratada-HFP})$$

2.3 Energia Solar

A Energia Solar é um bem indispensável para a vida na Terra, além de seu uso nos processos biológicos, a radiação solar está ligada direta ou indiretamente com diversas fontes de energia elétrica (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015), como podemos constatar na Figura 3 .

Figura 3 – Métodos de aproveitamento da energia solar



Fonte: Adaptado de (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015)

Este trabalho, terá como foco principal a produção de energia elétrica pelo processo de conversão fotovoltaica, aproveitando-se da radiação solar.

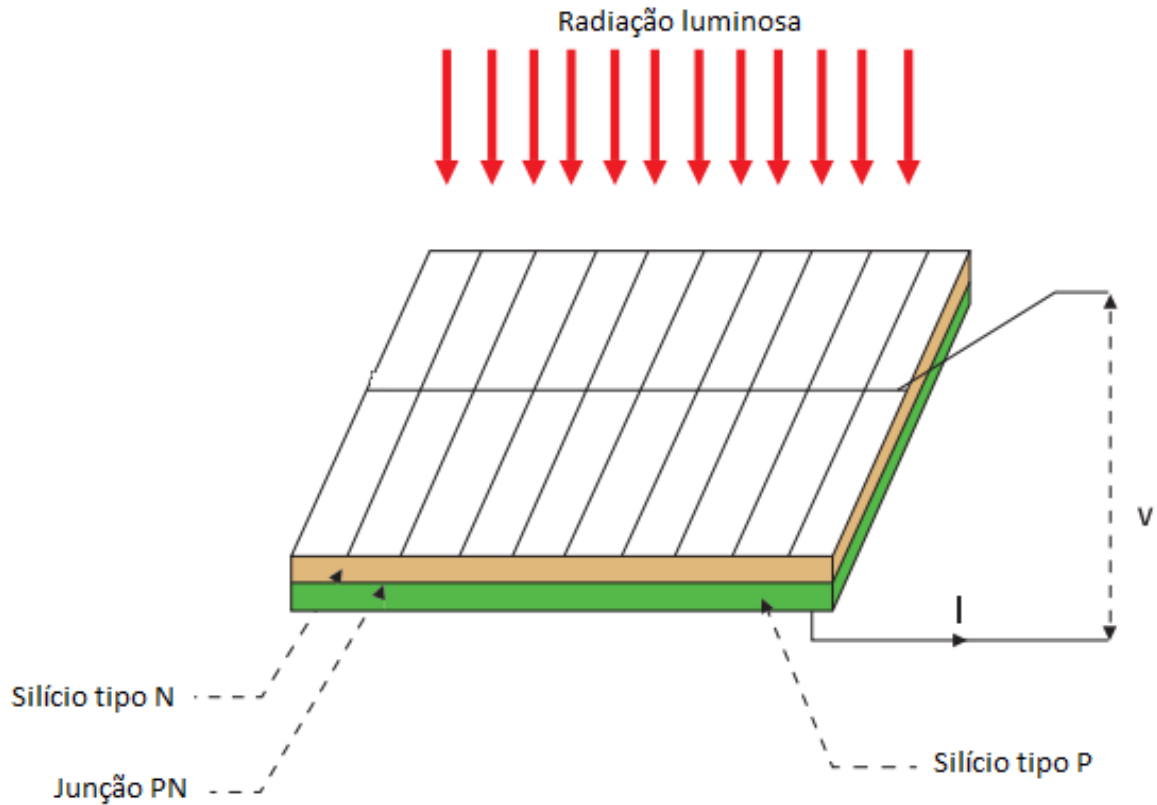
2.3.1 Célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é um dispositivo que usa o efeito fotovoltaico onde transforma energia luminosa em energia elétrica. A célula tem seu funcionamento parecido com o de um diodo fotossensível, composta por duas camadas de material semicondutor (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

Como pode ser observado na Figura 4, a primeira camada é feita de material semicondutor do tipo N com excesso de elétrons periféricos e a segunda camada é construída com material semicondutor do tipo P com déficit de elétrons, criando uma diferença de potencial entre às duas camadas. Quando a célula fotovoltaica recebe radiação luminosa, os elétrons periféricos

ganham energia e salta a barreira de potencial, criando uma corrente contínua. Para a condução desta corrente, existem 2 eletrodos nas camadas de semicondutores (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015).

Figura 4 – Esquema do funcionamento de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015)

Há diversos semicondutores que podem ser utilizados para a fabricação das células fotovoltaicas, mas o material mais utilizado atualmente é o silício cristalino. Este material possui duas divisões: o monocristalino e o policristalino.

2.3.1.1 Célula fotovoltaica de silício monocristalino

A célula fotovoltaica de silício monocristalino é fabricada cortando as barras de silício em fatias finas, formando um único cristal. Dessa forma, os elétrons possuem espaço suficiente para realizar o fluxo, aumentando a eficiência da célula quando comparadas ao silício policristalino (SOLAR, 2019).

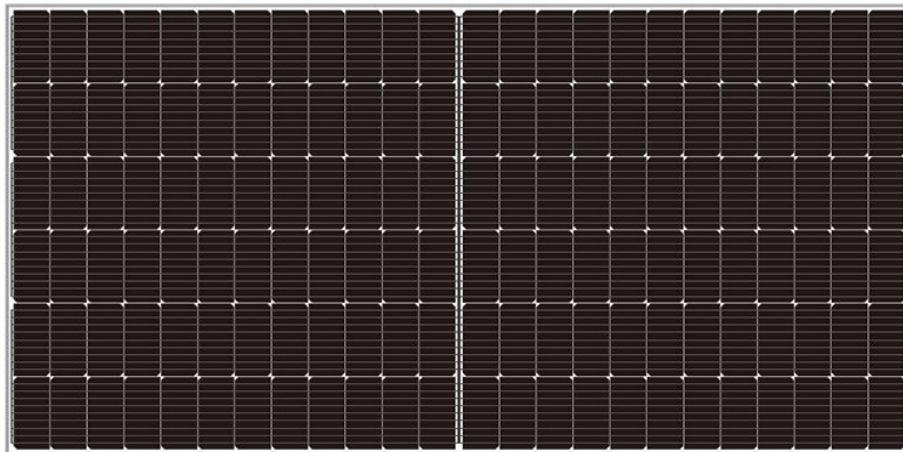
2.3.1.2 *Célula fotovoltaica de silício policristalino*

A célula fotovoltaica de silício policristalino é fabricada com a junção de vários cristais de silício. Com a existência de mais de um cristal, há menos espaço para os elétrons realizarem o fluxo, diminuindo a eficiência. Em compensação, esta categoria de célula é mais barata que a monocristalina (SOLAR, 2019).

2.3.2 *Módulo fotovoltaico*

O módulo fotovoltaico é uma combinação em série de diversas células fotovoltaicas encapsuladas por materiais especiais e interligadas por tiras metálicas sustentadas em uma base metálica, geralmente de alumínio, com a finalidade de geração de energia elétrica (NBR-10899, 2013). Pode-se ver na Figura 5 um exemplo deste dispositivo.

Figura 5 – Módulo fotovoltaico



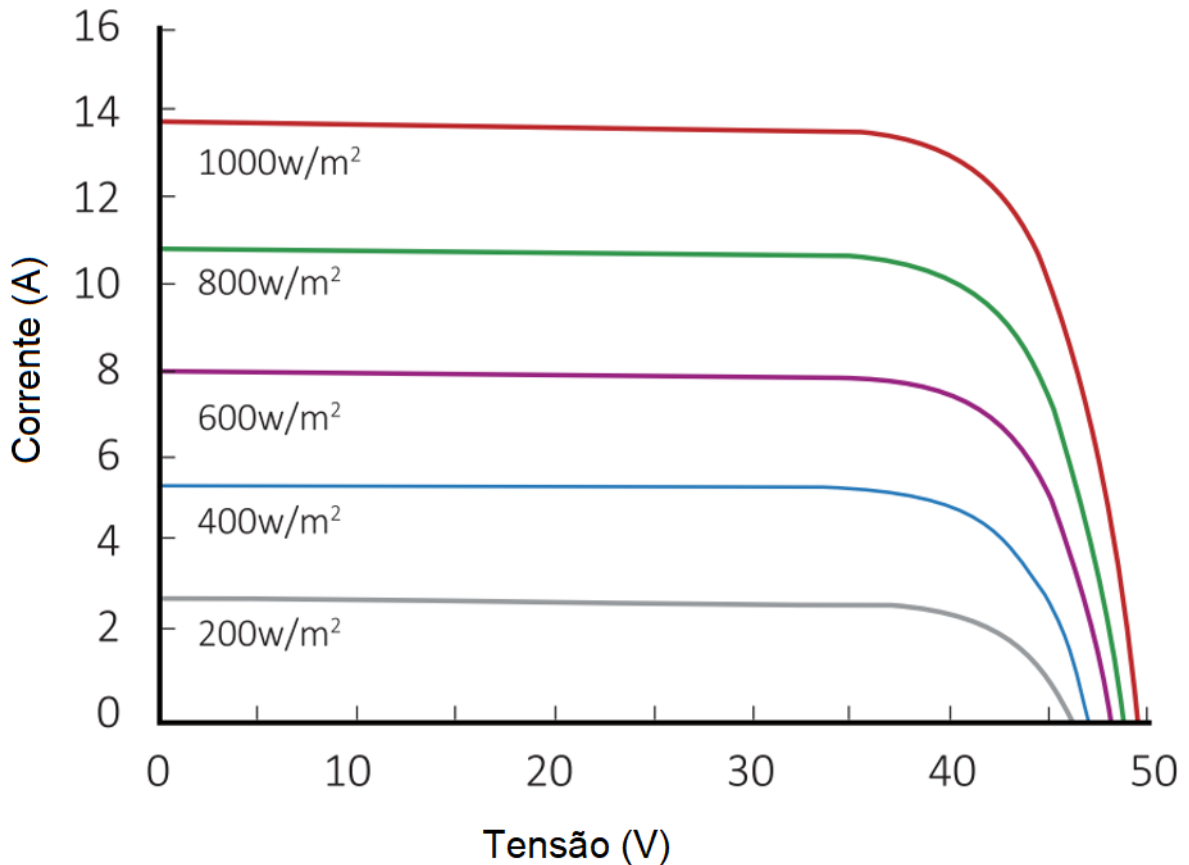
Fonte: (ENERGY, 2020)

2.3.3 Influência da irradiância e da temperatura

Os fatores externos que mais influenciam o potencial das células fotovoltaicas são a irradiância solar e a temperatura (ZILLES, 2012).

Como pode ser constatado na Figura 6, a corrente elétrica de um módulo solar aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica (PINHO; GALDINO, 2014). Deste modo, temos que locais que possuem maior irradiância média anual, tendem a ter uma maior capacidade de geração solar.

Figura 6 – Influência da irradiância na Curva IV

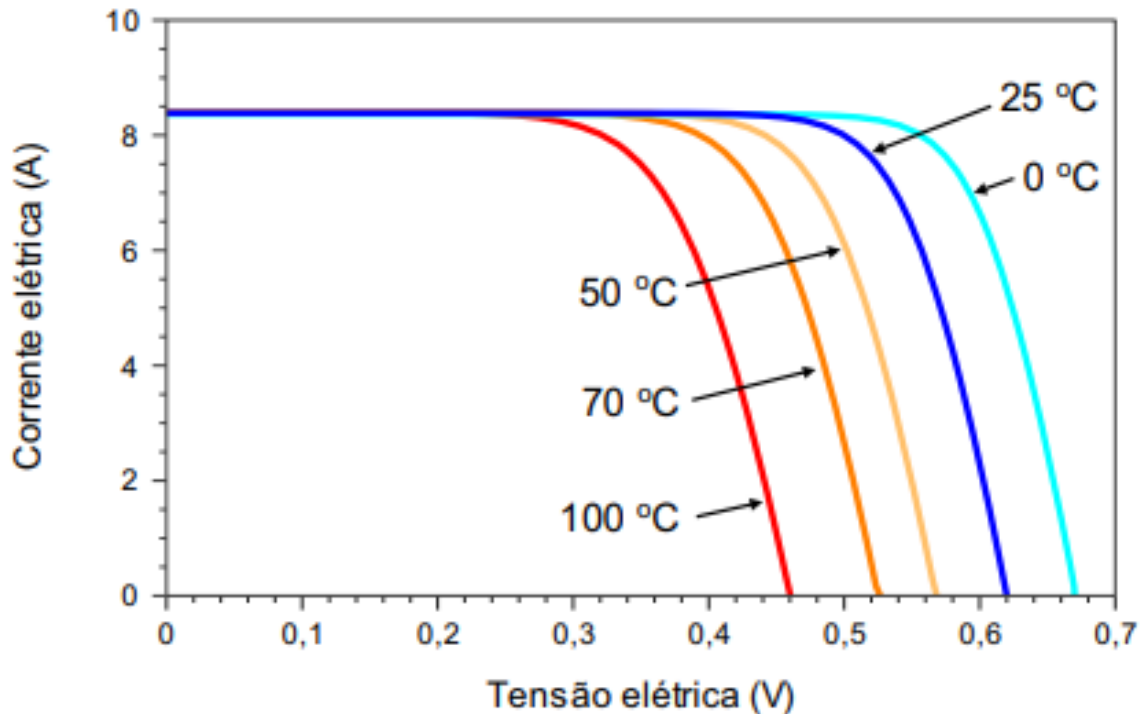


Fonte: Adaptado do Anexo A

Como já mencionado, a temperatura também é um fator externo que influencia o funcionamento de uma célula fotovoltaica. Com o aumento da irradiância ou da própria temperatura ambiente, a célula fotovoltaica terá sua temperatura elevada, diminuindo assim a sua eficiência. Tal fato ocorre, pois, a tensão diminui consideravelmente enquanto a corrente apresenta uma elevação quase desprezível (PINHO; GALDINO, 2014). Pode-se ver na Figura 7,

a influência da temperatura sobre a curva IV.

Figura 7 – Influência da temperatura na Curva IV



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

2.3.4 Influência do sombreamento

Como já mencionado, os módulos fotovoltaicos são formados pela combinação em série de células fotovoltaicas. Desta forma, todas as células irão apresentar a mesma corrente e as tensões individuais serão somadas. Quando ocorre o sombreamento de uma célula, esta terá a corrente de saída reduzida e limitará as demais células e módulos conectados em série, reduzindo então a eficiência do arranjo solar (PINHO; GALDINO, 2014).

Além da perda de potência do gerador fotovoltaico, o sombreamento consegue gerar um fenômeno chamado "ponto quente", do inglês "*hotspot*", visto que a potência elétrica gerada que não está escoando, será dissipada pelos módulos sombreados, aquecendo-os e podendo causar ruptura ou fusão dos polímeros (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4 Geração solar fotovoltaica

Como já mencionado, a geração solar fotovoltaica é a denominação da geração de energia elétrica por módulos solares. Para facilitar o entendimento e auxiliar o uso deste tipo de energia, pode-se dividi-la em tipos de geração e as normas que regem o seu funcionamento.

2.4.1 Geração solar centralizada

A geração solar centralizada se trata de usinas solares de grande porte que se localizam distante do consumidor e que, geralmente, são construídas para comercialização de energia nos leilões realizados pelo estado. Tal forma de produção de energia é responsável pela consolidação deste tipo de energia na matriz energética brasileira (ABSOLAR, 2019).

2.4.2 Geração solar distribuída

A Geração Distribuída (GD) é um termo utilizado para designar a geração elétrica próxima dos consumidores independente da potência, tecnologia ou fonte de energia. Neste trabalho, será abordado apenas a Geração Distribuída (GD) solar, que tem como fonte a energia proveniente por módulos solares (INNE, 2018).

As GD apresenta vantagem em relação à geração centralizada, pois, por estarem próximas aos consumidores, economiza investimentos em transmissão de energia e reduz as perdas nesses sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica (INNE, 2018).

2.4.3 Regulamentação nacional

Em abril de 2012, entra em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 que estabeleceu as condições gerais para a implementação de micro e minigeração distribuídas de energia elétrica. A partir deste momento, o consumidor brasileiro adquiriu o direito de gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2015a).

Ademais, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução normativa nº 687/2015 para revisar a Resolução Normativa nº 482/2012, para reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração, de compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica e de melhorar as informações na fatura (ANEEL, 2015a).

Com as normas vigentes no período de realização do estudo, a microgeração distri-

buída é caracterizada como uma central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e a minigeração distribuída com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015a).

Quando uma GD conectada a uma rede de distribuição gerar mais energia em um mês do que consumir neste mesmo período, o proprietário fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes desta mesma unidade consumidora ou pode ser utilizado para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situado em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora, caracterizando-se como uma usina de autoconsumo remoto. Vale ressaltar que o prazo de validade destes créditos gerados são de 60 meses (ANEEL, 2015a).

Durante a escrita deste trabalho, no dia 6 de janeiro de 2022 a Lei Federal nº 14.300 entrou em vigor. Esta Lei traz mudanças para o setor de geração própria, mas não invalida as Resoluções Normativas já existentes. Ocorreram mudanças na potência máxima instalada, passando de 5 MW para 3 MW na fonte solar, no método de compensação de créditos e no método de tarifação (GOV.BR, 2022).

É importante ressaltar, que todo o estudo foi realizado baseado nas Resoluções Normativas nº 482 de 2012 e a nº 687 de 2015.

2.4.4 Regulamentação distribuidora local

A Enel Distribuição Ceará é a empresa que atualmente possui a concessão para distribuir energia elétrica no estado do Ceará.

Em março de 2018, visando atender os critérios das resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Enel publicou a norma CNC-OMBR-MAT-18-0122-EDBR que estabelece as condições de acesso e define critérios técnicos, operacionais e requisitos de projetos aplicáveis à conexão de micro e minigeração distribuída aos seus sistemas de distribuição, para garantir que o sistema do cliente e o da distribuidora, após a conexão, operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade (ENEL, 2018).

Fica determinado que a potência das usinas fica limitada à potência disponibilizada para a unidade consumidora onde a central geradora será conectada. Além disso, determina o nível de tensão que a usina deve ser conectada, conforme a potência instalada (ENEL, 2018). Para as usinas instaladas no Ceará, devem ser seguidas as conexões mostradas na tabela 1.

Tabela 1 – Forma de conexão Enel Distribuição Ceará

Potência Disponibilizada (kW)	Tensão Nominal (V)	Sistema Elétrico
≤ 10	220	Baixa Tensão (monofásico)
> 10 e ≤ 20	380	Baixa Tensão (bifásico)
> 20 e ≤ 75	380	Baixa Tensão (trifásico)
> 75 e ≤ 5000	13800 / 69000	Média Tensão / Alta Tensão

Fonte: (ENEL, 2018)

2.5 Áreas suscetíveis a desertificação

A Convenção Internacional de Combate à Desertificação realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) definiu desertificação como sendo a degradação da terra nas zonas áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas, resultantes de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas (BRASIL, 1998).

2.5.1 ASDs no Brasil

As ASDs no Brasil, quase que em sua totalidade, encontram-se na região nordeste. A área em desertificação de forma grave ou muito grave já contabiliza os 180 mil quilômetros quadrados. Além disso, diversos locais, já se encontram imprestáveis para a agricultura (AEASE, 2017).

Ademais, quando se considera as áreas moderadamente afetadas, o total de terrenos atingidos pelo fenômeno ultrapassa os 574 mil quilômetros quadrados, em comparação com a área da região nordeste, este número representa mais de 30% (AEASE, 2017).

Outro fator que agrava a desertificação no nordeste brasileiro é o fato dessa localidade ser a região semi-árida mais populosa do mundo, ultrapassando 18 milhões de habitantes (AEASE, 2017).

2.5.2 ASDs no Ceará

O estado do Ceará é um dos estados do nordeste mais atingidos pelo fenômeno da desertificação e como já relatado no Capítulo 1, 100% do seu território encontra-se dentro das ASDs. Parte desta desertificação do estado, origina-se de intensos desmatamentos, prática de queimadas e ocupação desordenada do solo (AEASE, 2017).

Além disso, os solos do estado são rasos, pedregosos e as camadas de terra foram reti-

radas em abundância e de forma uniforme, provocando o afloramento das rochas e desencadeando a erosão laminar (AEASE, 2017).

2.5.3 Aspectos socioeconômicos nas ASDs

A desertificação provoca importantes impactos na sociedade e na economia em todo o mundo. Devido o fato desses locais terem um baixo aproveitamento econômico, há um aumento na migração dos habitantes dessas regiões para os centros urbanos, causando um povoamento exagerado dos centros urbanos (AEASE, 2017).

Apesar dos efeitos socioeconômicos que a desertificação consegue causar, a classe social que habita as ASDs, também é um fator importante para este processo. Visto que quando povoado por pessoas que utilizam o solo de forma não cautelosa o processo tende a ser acelerado (RODRIGUES, 2007).

2.5.4 Aspectos físicos nas ASDs

Devido as ASDs se localizarem nas zonas áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas, apresentam um clima seco, de elevada evapotranspiração e de poucas chuvas (ARAÚJO, 2011).

Além disso, o processo de desertificação resulta na perda da massa florestal e da cobertura vegetal, deixando o acesso ao terreno limpo e sem nenhum sombreamento (IBERDROLA, 2021).

Ademais, segundo (PEREIRA *et al.*, 2017), o semiárido nordestino apresenta uma alta irradiação solar direta e uma baixa nebulosidade, fenômeno que não acontece no restante do país.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

O Governo do Estado do Ceará é um relevante consumidor, devido a sua carga instalada e a importância para a sociedade de suas unidades consumidoras do Grupo B, que segundo a SEINFRA representam mais de 80% dos consumidores pertencentes ao estado (CARVALHO, 2019).

Conforme apresentado no capítulo 2, todo o território do Ceará tem a probabilidade de se tornar desertificado. Nesse contexto, o intuito deste trabalho será analisar o potencial de geração solar nessas áreas e os ganhos econômicos da implementação de geração distribuída para as unidades consumidoras de baixa tensão do Governo do Ceará. Por fim, foram feitos os seguintes passos para chegar nessa análise:

- I. Processo de aquisição de dados;
- II. Manipulação de dados georreferenciados;
- III. Definição do potencial de geração;
- IV. Criação de um mapa interativo;e
- V. Definição do consumo elétrico das UC's do grupo B do Governo do Estado do Ceará.

3.2 Processo de aquisição de dados

No aspecto geral, foram necessários diversos tipos de dados para a realização do trabalho. Dessa forma, foi necessário utilizar de técnicas de *Extract, transform, load* (ETL) utilizando a linguagem de programação *Python* para construir uma base de dados sólida para uso no trabalho.

3.2.1 *Extract, transform, load* (ETL)

Com o crescimento da *web* e o uso massivo de tecnologias da informação, a quantidade de dados gerados e disponibilizados tem crescido exponencialmente, estimava-se que em 2020 estariam disponíveis mais de 40 trilhões de gigabytes de dados (BRASIL, 2017).

Visto esse crescimento exponencial, foi necessário utilizar métodos para integrar e manipular todos os tipos de dados e para isto foi criado o *Extract, transform, load* (ETL). O ETL

pode extrair, combinar e exibir dados de transações de um *data warehouse*, sendo um sistema de gerenciamento de dados projetado para ativar e fornecer suporte às atividades de *business intelligence (BI)*, especialmente a análise avançada, de modo que eles estejam sempre prontos para analistas de negócios os visualizarem em um formato compreensível (SAS, 2018).

O processo de ETL, segundo (ASTERA, 2020), pode ser dividido em 3 etapas:

- I. **PROCESSO DE EXTRAÇÃO:** Fase em que os dados são extraídos de diversas fontes. Nesta etapa, os dados compilados devem ser organizados de acordo com data, tamanho e fonte para se adequar ao processo de transformação.
- II. **PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO:** É nesta etapa onde os dados extraídos das fontes são compilados, convertidos, reformatados e limpos na área de teste.
- III. **PROCESSO DE CARGA:** A última etapa consiste em carregar os conjuntos de dados extraídos e transformados anteriormente no banco de dados de destino.

Neste trabalho, não foram utilizados banco de dados relacionais ou não relacionais, desta forma, o último passo do ETL não foi necessário.

3.2.2 *Extração*

Para realizar o estudo foram necessários o uso dos dados das Áreas em Desertificação (AEDs) no estado no Ceará, dos dados das linha de distribuição de média tensão (LDMT), dos dados de irradiância e dos dados de consumo das UC pertencentes ao grupo B do Governo do Estado do Ceará.

A grande dificuldade encontrada foi a não existência dos dados de forma online para que fosse possível realizar a extração. Dessa forma, foi necessário conseguir as informações por contatos diretos.

Para os dados das AEDs, o Programa Cientista Chefe entrou em contato com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Para as informações sobre as LDMT o programa contatou a Enel Distribuição Ceará.

Os dados de irradiação foram extraídos do Atlas Solar Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017) nos formatos de valores separados por vírgulas (csv) e Shapefile (shp).

Os dados de consumo das UC do Estado do Ceará foram cedidos pela Secretaria da Infraestrutura (SEINFRA) para este estudo, englobando os dados de mais de 2.300 unidades pertencentes ao grupo B espalhadas por todo o estado.

3.2.3 Transformação

Após a extração dos dados, seguiu-se o processo de transformação, processo este responsável por organizar os dados. Devido à base de dados ser composta por dados georreferenciados e por dados de linha, foi decidido não juntar as bases em uma única. Desta forma, cada conjunto foi tratado de forma particular, excluindo-se os dados não necessários e ajustando os seus formatos.

Para este processo, além da utilização da linguagem *Python*, também foi necessário manipular os dados com o Software *Google Earth*. No final desta etapa, os dados já estão tratados e prontos para serem utilizados nos estudos, visto que não haverá a terceira etapa do ETL.

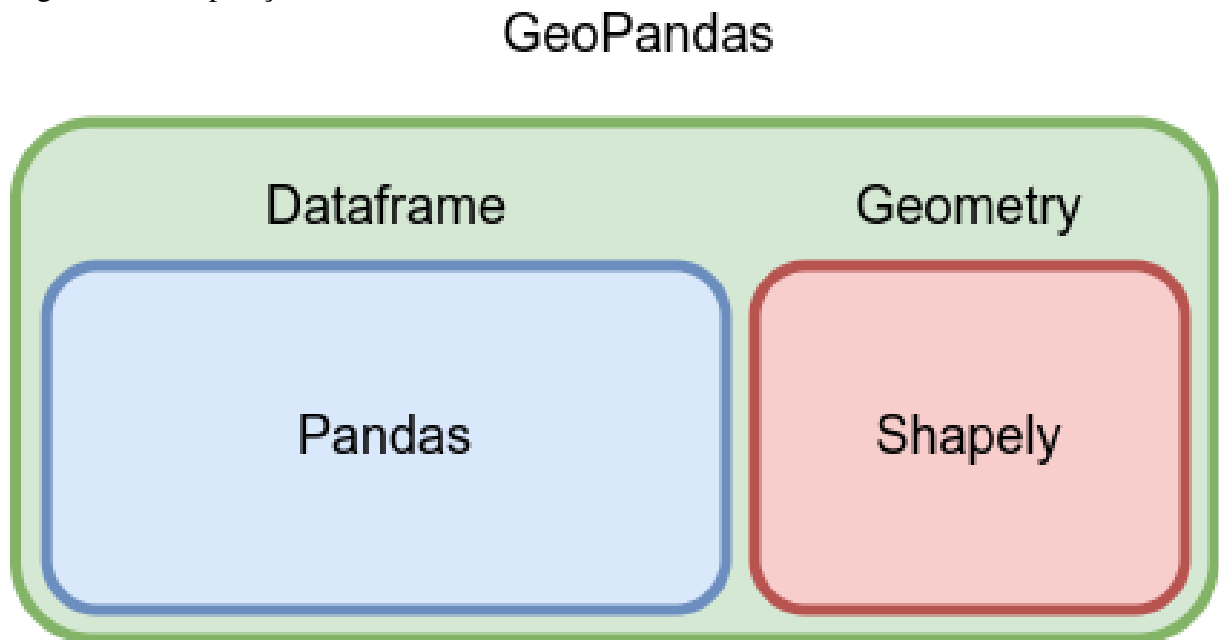
3.3 Manipulação de dados georreferenciados

Para a realização do estudo, foram utilizados dados georreferenciados, ou seja, dados cuja localização está associada a uma posição sobre/sob a superfície terrestre (UNIFAL, 2018), desta forma, foi necessário encontrar uma forma de manipulá-los.

A solução encontrada foi a de utilizar a biblioteca *GeoPandas* da linguagem *python*.

3.3.1 *GeoPandas*

Geopandas é um projeto de código aberto para facilitar o trabalho com dados geoespaciais em *python*. Esta biblioteca é muito similar a biblioteca *Pandas* utilizada para manipular *DataFrames* na linguagem *python*, diferencia-se na adição de uma coluna denominada *Shapely* no final do *DataFrame* como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Composição de um *DataFrame* no GeoPandas

Fonte: (SCIENCE, 2021)

3.3.2 Tipos de dados georreferenciados

Para manipular os dados, foi necessário dividi-los em tipos de estrutura, os dados das LDMT foram categorizados como *LineString*, ou seja, foram representados como segmentos de reta espaciais, podendo ser realizadas operações de interação e medir a distância deles. Por outro lado, os dados das áreas desertificadas foram categorizados como *Polygon*, ou seja, foram representados como áreas espaciais, podendo ser realizadas operações de interação e medir a área deles.

3.3.3 Projeção de dados georreferenciados

Ao se trabalhar com dados georreferenciados, um dos maiores cuidados que se deve ter é nas projeções utilizadas nos dados. Ao realizar operações que terão como resultado uma área ou uma distância é essencial que os dados não estejam distorcidos.

Dessa forma, foi utilizada a projeção cilíndrica de áreas iguais (SPHINX, 2019) com a finalidade de planificar os dados e permitir que a operação de interseção seja possível.

3.3.4 Intercessão entre dados

Com todos os dados em uma projeção plana, foi possível realizar a intercessão entre as AEDs e os municípios do estado do Ceará, assim como também com as LDMT e os dados de irradiação solar.

Desta forma, consegue-se consolidar uma base de dados para cada município do estado contendo a área desertificada em km², a distância das LDMT em km e a irradiação solar em kW/m².

3.4 Definição do potencial de geração

Devido a características de inclinação, irradiância solar e espaço geográfico que cada local apresenta, não foi possível estabelecer um sistema fotovoltaico padrão. Desta forma, será realizado uma expectativa de geração solar para das AEDs.

Para este cálculo, definem-se as seguintes variáveis.

- P = potência do módulo fotovoltaico escolhido, em kWp;
- Am = Área do módulo fotovoltaico escolhido, em m²;
- Fo = Fator de ocupação de um módulo fotovoltaico (considerando espaçamento, subestação e sombreamento);
- Qt = Quantidade de módulos fotovoltaicos;
- Ir = Irradiância solar incidente, em kW/m²;
- Ad = Área em desertificação, em m²;
- Fu = Fator de uso do terreno;
- Pe = Perda de geração devido à conversão e cabeamento;
- Gd = Geração diária esperada, em GWh;
- Gm = Geração mensal esperada, em GWh;
- Ga = Geração anual esperada, em GWh;

Primeiramente, é necessário calcular a quantidade de módulos fotovoltaicos que a área em desertificação comporta. Para obter este número, foi utilizada a equação 3.1.

$$Q_t = \frac{A_d * F_u}{A_m * F_o} \quad (3.1)$$

Com a quantidade de módulos calculada, pode-se encontrar a geração diária esperada utilizando a equação 3.2.

$$Gd = \frac{(P * Qt * Ir) * (1 - Pe)}{10^6} \quad (3.2)$$

Para encontrar as gerações mensal e a anual esperada, pode-se utilizar as equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$Gm = Gd * 30 \quad (3.3)$$

$$Ga = Gm * 12 \quad (3.4)$$

3.4.1 Módulo fotovoltaico

Sendo o módulo solar um dos principais elementos que irão compor uma usina solar, é de suma importância que seja escolhido um módulo com boas especificações e de fabricantes consolidados no mercado e com larga aplicação nacional.

Conforme o Estudo Estratégico do Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída - 1º Semestre 2021 realizado pela Greener, o fabricante de módulos mais presente é a LONGi, seguido por Trina Solar e Canadian (GREENER, 2021).

Assim, considerando os fabricantes supracitados e as interseções entre as pesquisas, selecionaram-se três módulos fotovoltaicos que se encontram disponíveis em mercado:

- LONGi Solar Monocristalino Bifacial LR5-72HBD-540M de potência nominal de 540Wp;
- Trina Solar Monocristalino Bifacial TSM-DEG15MC.20(II) de potência nominal de 410Wp; e
- Canadian Solar Monocristalino Bifacial CS3W-445MB-AG de potência nominal de 455Wp.

As principais características dos módulos estudados foram retiradas dos *datasheet* fornecidos pelos fabricantes dos mesmos.

Sabendo que os módulos analisados possuem características de degradação similar e considerando a maior potência instalada por módulo, optou-se por utilizar o módulo LONGi Monocristalino Bifacial com 540W de potência nominal como referência.

Conforme o *datasheet*, Anexo A fornecido pelo fabricante, o módulo LONGi Monocristalino Bifacial com 540W de potência nominal tem vida útil média de 30 anos. Com o passar

do tempo, estes Módulos enfrentam danos causados por variações de temperatura, exposição a raios U.V, poluição, entre outros, denominados de degradação do módulo. Esta degradação ocasiona a perda gradativa de rendimento da placa, que no primeiro ano é 2% e nos demais de 0,45%, de forma que ao final do 30º (trigésimo) ano, apresentará 84,95% o que equivale a uma potência nominal de 458,73Wp.

Além disso, para o cálculo do potencial de geração solar fotovoltaico, foi considerado o método de instalação dos módulos em solo com inclinação de 5º e orientação ao norte.

3.4.2 Fator de ocupação

Devido o módulo solar não ser o único equipamento a compor uma usina, é necessário criar um fator de ocupação do módulo solar para contemplar os demais equipamentos.

Este fator, tem a função de agregar à área do módulo solar, os espaçamentos entre os próprios módulos, o espaçamento entre as mesas de fixação no solo, os transformadores, a cabine de proteção e a casa de operação e manutenção.

Analisando projetos de usinas solares com potência instalada próximas a 5MW, foi possível determinar uma relação entre a área ocupada pelos módulos fotovoltaicos e a área total da usina. Com isso, foi definido que este fator seria de 2,85.

3.4.3 Fator de uso do terreno

Devido a grande extensão das áreas em desertificação e das cidades presentes nessas áreas, não é possível utilizar 100% do espaço para geração solar.

Deste modo, este fator assumirá dois valores. O primeiro valor será definido como a área necessária para suprir a demanda de consumo das UC do grupo B do estado do Ceará. O segundo valor será de 10% para realizar uma comparação e uma demonstração do potencial.

3.4.4 Perdas elétricas

No funcionamento de um sistema fotovoltaico, há inúmeras perdas que devem ser consideradas no momento de calcular a expectativa de geração. Como principais fatores, pode-se citar as perdas por sombreamento do módulo, as perdas no cabeamento CC, as pernas no cabeamento CA e transformação de energia realizada no inversor.

Com estas considerações, foi definido um valor de 10% de perda sobre o total de

geração.

3.5 Criação de um mapa interativo

Com o potencial de geração solar das AEDs calculado, foi necessário encontrar um método de visualização que deixasse os dados mais interativos.

Desta forma, decidiu-se utilizar a biblioteca *Folium* da linguagem *python* que permite criar mapas e incorporar formatos, informações e indicadores. Um exemplo básico da geração de mapa pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de mapa criado utilizando *Folium*



Fonte: O autor.

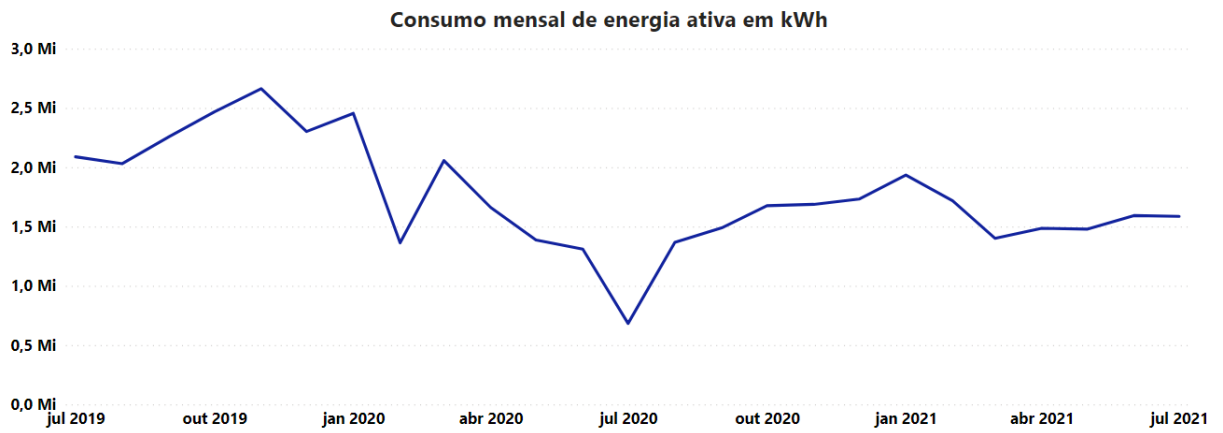
3.6 Definição do consumo de energia das UC's do grupo B do Governo do Estado do Ceará

Os dados de consumo das UC's do grupo B do Estado do Ceará, cedidos pela Secretaria da Infraestrutura (SEINFRA), foram tratados no processo de ETL e no final, tem-se uma base ajustada para analisar.

Com estes dados, foi realizada uma análise histórica, a partir de julho de 2019 até julho de 2021, para determinar o consumo médio e os limites superiores e inferiores. Na Figura

10, é possível visualizar o comportamento de consumo deste grupo.

Figura 10 – Perfil de consumo das UC's do grupo B do Governo do Estado do Ceará



Fonte: O autor.

Em posse do valor médio de consumo mensal estabelecido, foi possível realizar uma previsão da área de desertificação necessária para suprir o consumo. Este valor pode ser encontrado, manipulando as equações 3.2 e 3.1 e será utilizado como um dos valores de fator de uso do terreno.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com a manipulação dos dados georreferenciados e a geração do mapa interativo foi possível determinar o potencial de geração nas AEDs. Além disso, com os dados de consumo das UC do Governo do Estado do Ceará, foi possível estabelecer uma comparação entre os gastos mensais e a implementação do projeto fotovoltaico. Desse modo, essa seção será dividida nesses 6 tópicos:

- I. Definição da área necessária;
- II. Potencial de geração solar;
- III. Ranking de geração;
- IV. Mapa interativo;
- V. Gastos de implementação; e
- VI. Análise financeira.

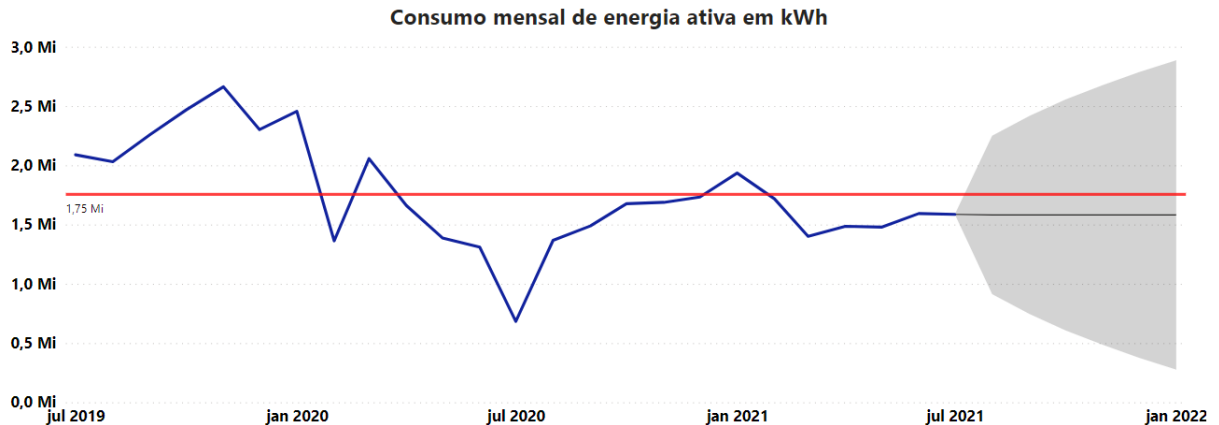
4.1 Definição da área necessária

Para determinar a área necessária, o primeiro passo é estipular o valor de consumo mensal médio das UC's do grupo B do estado do Ceará a partir dos dados já demonstrados na seção 3.6. O segundo passo será realizar cálculo da área necessária para suprir a demanda de consumo.

4.1.1 *Consumo mensal*

Nesta etapa, foi utilizada como base a Figura 10. Utilizando o *software* Power BI, realizou-se uma previsão para os próximos 6 meses com uma confiança de 95%, completando assim o ano de 2021. Com a previsão realizada, foi realizada a média dos valores de consumo mensais de energia ativa, resultando em um valor de 1,75 GWh como pode ser constatado na figura 11.

Figura 11 – Previsão de consumo e consumo médio das UC's do grupo B do Governo do Estado do Ceará



Fonte: O autor.

Considerando-se que os dados analisados foram coincidentes com o período da pandemia do COVID-19 onde o consumo de energia demonstrou um comportamento único (EPE, 2020b), o consumo médio será ajustado em 14%. Assim o consumo médio utilizado será de 2 GWh e esta consideração criará um excedente de 3 GWh por ano.

4.1.2 Cálculo da área necessária

Com a determinação do consumo mensal, é realizado o cálculo inverso demonstrado na Seção 3.4. Para este caso, serão utilizados os seguintes valores:

Tabela 2 – Variáveis para cálculo de área

Variável	Valor	Unidade	Origem
Fu	Cálculo	-	Variável alvo
P	0,54	kW	Anexo A
Am	2,56	m ²	Anexo A
Fo	2,85	-	Seção 3.4.2
Qt	Cálculo	und.	Seção 3.4
Ir	5,66	kW/m ²	Código <i>python</i>
Ad	16682,47*10 ⁶	m ²	Código <i>python</i>
Pe	0,1	-	Seção 3.4.4
Gd	Cálculo	GWh/dia	Seção 3.4
Gm	2	GWh/mês	Seção 4.1.1

Fonte: O autor

Pela Equação 3.3 e os valores da Tabela 2, obtém-se:

$$Gd = \frac{Gm}{30} = \frac{2}{30} = 0,067 \text{ GWh/dia} \quad (4.1)$$

Substituindo a Equação 3.1 na Equação 3.2 e isolando o Fu , obtém-se:

$$Fu = \frac{Gd * 10^6}{P * Ir * (1 - Pe)} * \frac{Am * Fo}{Ad} \quad (4.2)$$

Substituindo os valores na Equação 4.2, obtém-se:

$$Fu = \frac{Gd * 10^6}{P * Ir * (1 - Pe)} * \frac{Am * Fo}{Ad} = \frac{0,067 * 10^6}{0,54 * 5,66 * (1 - 0,1)} * \frac{2,56 * 2,85}{16682,47 * 10^6} \approx 0,00001065 \quad (4.3)$$

Multiplicando o fator de uso do terreno encontrado na Equação 4.3 pela área suscetível a desertificação, encontra-se que a área necessária para suprir todo o consumo das UC's do grupo B do estado do Ceará é de 0,18 km² ou 18 hectares. A potência total instalada de todas as usinas solares necessárias seriam de 13 MWp.

4.2 Potencial de geração solar

As AEDs correspondem a 11% do território do Ceará, ou seja, mais de 16,6 mil km² e neste tópico, será demonstrado o potencial de geração solar dessas áreas considerando o uso de 10% dos terrenos afetados como demonstrado na Seção 3.4.3.

As equações da Seção 3.4 foram implementadas no código em *python* sendo aplicadas individualmente para cada município.

Somando-se os resultados encontrados para cada município, encontra-se o valor total de geração do estado do Ceará nas AEDs. O valor encontrado é de 230.194,48 GWh por ano ou 230,2 TWh por ano. Apresentando uma potência instalada de 123,5 GWp.

Fazendo uma comparação com o consumo demandado pelas UC's do grupo B do estado do Ceará, 10% do terreno seria suficiente para abastecer todas as unidades pelo menos 9500 vezes.

4.3 Ranking de geração

Com o potencial de geração já calculado, é necessária uma indicação dos melhores locais de instalação das usinas. Desta forma, será realizado um *ranking* dos melhores municípios

e para possibilitar uma visão mais estratégica, será montado uma visão com as microrregiões de planejamento do estado do Ceará.

Além da área desertificada e do potencial de geração que cada município apresenta, também foi considerado a extensão das LDMT para determinar os melhores municípios.

Ademais, a geração anual demonstrado nas Tabelas 3 e 4 foram calculadas utilizando o Fu determinado na Seção 3.4.3 para poder evidenciar o potencial de geração.

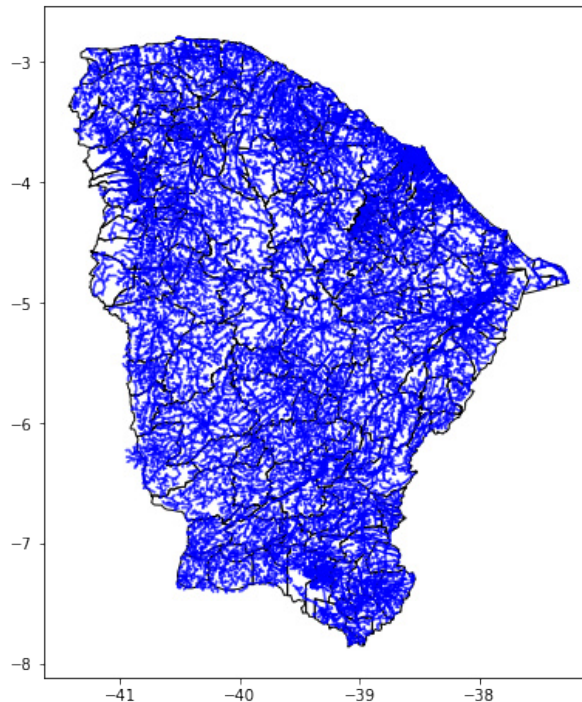
4.3.1 Extensão das LDMT nas AEDs

As LDMT são extremamente importantes para uma minigeração solar, visto que a energia produzida na usina precisa escoar a energia excedente para a distribuidora local e esse fenômeno será realizado conectando a usina à rede.

Desta forma, é crível que locais que possuem uma maior extensão de LDMT, provavelmente, apresentarão uma maior viabilidade de instalação da usina, dado que não haverá ou apresentará um baixo custo com expansão de rede.

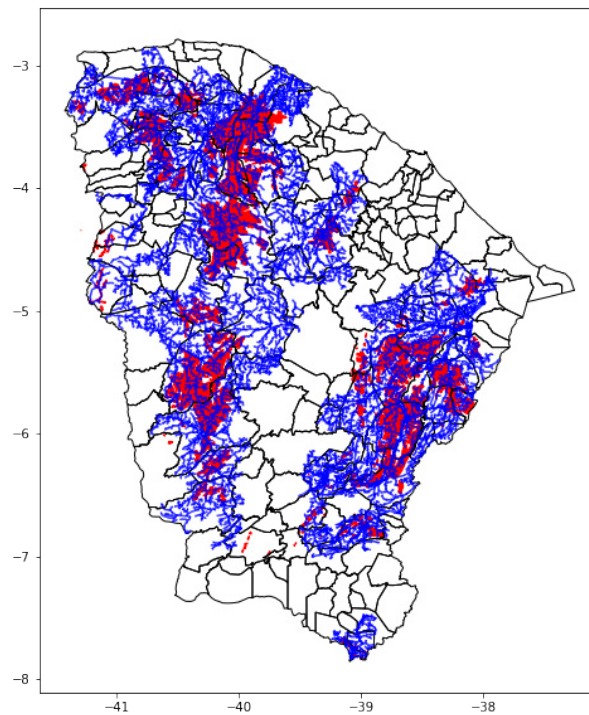
Na Figura 12, é possível ver todas as LDMT do estado do Ceará, cruzando as localizações das linhas com as áreas suscetíveis a desertificação, é formada a Figura 13.

Figura 12 – Representação das LDMT do estado do Ceará



Fonte: O autor.

Figura 13 – Interação entre as LDMT e as AEDs do estado do Ceará



Fonte: O autor.

4.3.2 10 melhores municípios para implementação

Com todos os dados já calculados, pode-se montar o ranking dos melhores municípios para implementação das usinas fotovoltaicas nas AEDs.

Na Tabela 3, será demonstrado os 10 maiores municípios considerando a área desertificada, comprimento da LDMT e irradiância, todos com peso unitário.

Tabela 3 – Categorização dos municípios para implementação do projeto

Município	Área (km²)	AEDs (km²)	LDMT (km)	Irradiância (kW/m²)	Geração anual (GWh)
Jaguaribe	1875,618	1113,606	1142,871	5,908	15996,187
Jaguaretama	1825,404	962,249	709,218	5,911	13829,059
Icó	1864,409	492,153	521,131	5,918	7081,4
Alto Santo	1146,491	429,748	255,206	5,861	6123,927
Lavras da Mangabeira	944,512	126,355	83,063	5,936	1823,611
Morada Nova	2762,04	477,39	274,769	5,848	6787,736
Potiretama	408,897	158,064	58,383	5,921	2275,472
Iracema	838,619	115,141	67,066	5,912	1655,035
Jaguaribara	622,51	205,299	191,648	5,845	2917,537
Tabuleiro do Norte	1047,114	76,579	478,957	5,84	1087,338

Fonte: O autor

4.3.3 Ranking das microrregiões de planejamento do estado do Ceará

Para categorizar as microrregiões de planejamento do estado do Ceará, foi realizado a junção de todos os municípios correspondentes, somando o valores das AEDs, das extensões das LDMT e fazendo a média das Irradiâncias.

O resultado dessa categorização pode ser verificado na Tabela 4.

Tabela 4 – Ranking das microrregiões de planejamento do estado do Ceará

Região	Área (km ²)	AEDs (km ²)	LDMT (km)	Irradiância (kW/m ²)	Geração anual (GWh)
Sertão dos Crateús	20606,769	4438,742	2205,87	5,594	60969,233
Vale do Jaguaribe	15008,113	3676,723	3277,156	5,858	52625,993
Sertão de Sobral	8510,754	2668,779	1618,644	5,501	35746,931
Litoral Oeste / Vale do Curu	8905,845	1854,474	1101,924	5,51	25088,56
Sertão dos Inhamuns	10871,371	1464,266	897,257	5,64	20135,41
Litoral Norte	9371,724	913,293	663,731	5,544	12176,067
Centro Sul	11546,951	611,438	690,597	5,857	8782,616
Sertão de Canindé	9153,997	456,684	536,267	5,601	6257,119
Sertão Central	16006,539	329,472	138,032	5,707	4624,768
Cariri	17405,292	193,247	171,1	5,823	2760,932
Serra da Ibiapaba	5721,475	75,354	118,503	5,523	1026,857
Grande Fortaleza	7428,356	0	0	5,646	0
Litoral Leste	4596,649	0	0	5,838	0
Maciço de Baturité	3725,887	0	0	5,505	0

Fonte: O autor

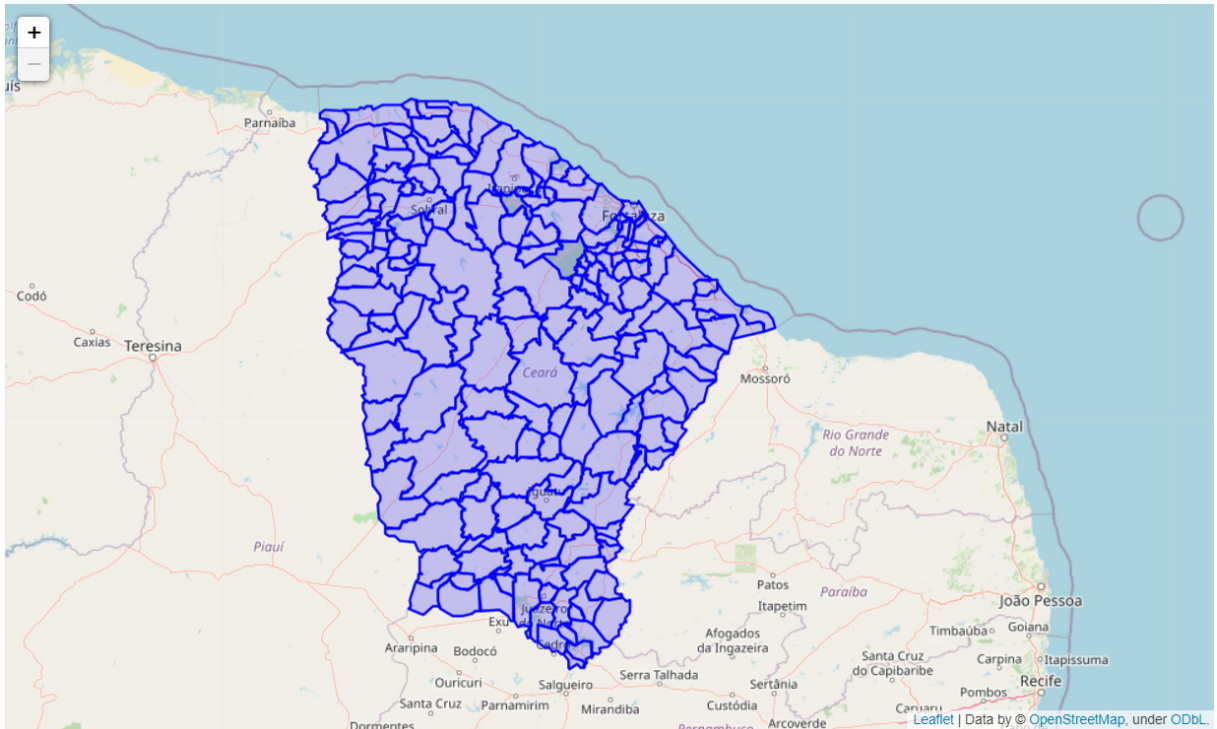
4.4 Mapa interativo

Como já exposto na Seção 3.5, além da visualização dos resultados de forma tabular, foi definido que os dados também seriam visualizados em um formato mais interativo.

Com a determinação de todos os dados já demonstrados, foi realizado a criação do mapa interativo utilizando a biblioteca *Folium*.

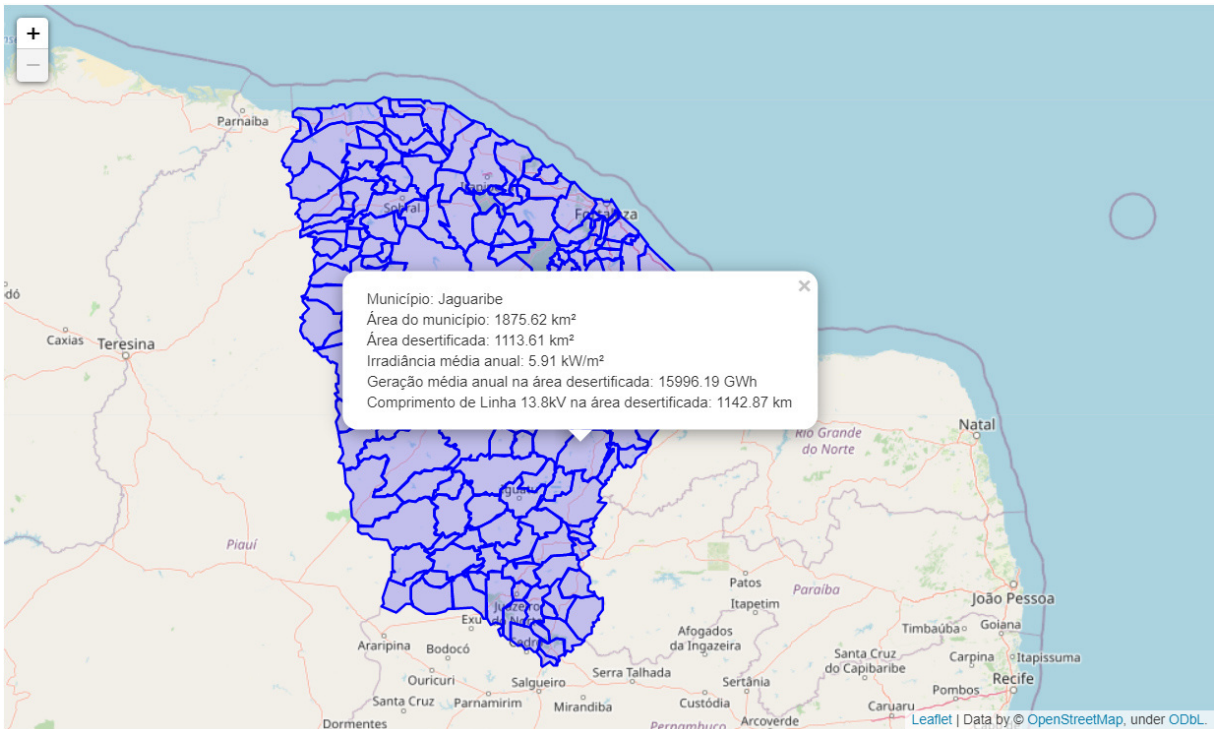
O mapa em questão contempla todo o estado do Ceará, atribuindo para cada município um *pop-up* contendo todas as informações definidas neste trabalho. Na Figura 14, tem-se o mapa interativo finalizado e na Figura 15 pode-se ver um exemplo do *pop-up* que aparece ao clicar em algum município.

Figura 14 – Mapa interativo do Ceará



Fonte: O autor.

Figura 15 – Exemplo de *pop-up* no mapa interativo



Fonte: O autor.

As informações sobre geração anual foram calculadas considerando o $F_u = 10\%$ para expressar o potencial que essas áreas apresentam.

4.5 Gastos de implementação

Já tendo visto os pontos técnicos de geração, é ideal analisar também a parte econômica. Serão analisados dois cenários, o primeiro considerando o F_u encontrado na seção 4.1.2 e o segundo considerando o F_u da seção 3.4.3.

Em ambos os cenários supracitados, a potência instalada de geração superou os 5MWp. Deste modo, para realizar a previsão dos custos de implementação, será utilizado o valor de R\$ 3,95 para cada Wp.

O valor de referência utilizado representa o custo para o cliente final para usinas de solo de 5 MWp e foi retirado do Estudo Estratégico de Geração Distribuída Solar realizado pela Greener no 1º semestre de 2021 (GREENER, 2021).

Tendo o valor definido, é possível calcular os gastos totais para a implementação. O resultado está registrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Custo de implementação das usinas

Cenário	Potência instalada (MWp)	Custo por Wp	Custo final
$F_u = 1,07 \cdot 10^{-5}$	13,00	R\$ 3,95	R\$ 51.350.000,00
$F_u = 0,1$	123.500,00	R\$ 3,95	R\$ 487.825.000.000,00

Fonte: O autor

4.6 Análise financeira

Para a viabilidade do projeto, foi realizada a análise financeira de sua implementação. O projeto a ser analisado é o da usina proposta com o F_u suficiente para atender os consumidores de baixa tensão do Governo do Estado do Ceará, conforme calculado na seção 4.1.2.

Este tópico utiliza dois métodos para atestar a viabilidade. Sendo o primeiro o método de *Payback* simples e o segundo será o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR).

4.6.1 Payback simples

Para realizar o cálculo do *Payback* simples, foi utilizada a taxa de depreciação do módulo fotovoltaico de 2% para o primeiro ano e 0,45% para os demais anos até completar 30 anos, conforme mostrado na seção 3.4.1, para simular o decaimento de geração no período analisado.

Além disso, foi utilizado o valor de 0,73078 como tarifa energia sem incidência de ICMS visto que o Governo do Estado do Ceará não paga este imposto, retirada da Resolução Homologatória nº 2.859, de 22 de abril de 2021 (ENEL, 2020) e para ajustar o valor no período analisado foi considerado um aumento de 7,8% anual segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2020a).

O resultado da análise completa pode ser visto na Tabela 6. É possível observar que o projeto começa a apresentar um retorno financeiro a partir do 4º ano de implementação, representando apenas 15% da vida útil do projeto. Além disso, após os 30 anos de implementação, promove uma economia maior que 1,6 bilhão de reais.

Tabela 6 – Resultado da análise de *Payback* simples

Ano	Geração Anual (GWh)	Economia Anual (R\$)	Saldo Anual (R\$)
1	24	R\$ 15.346.380,00	-R\$ 36.003.620,00
2	23,52	R\$ 16.543.397,64	-R\$ 19.460.222,36
3	23,41	R\$ 17.833.782,66	-R\$ 1.626.439,70
4	23,31	R\$ 19.224.817,70	R\$ 17.598.378,00
5	23,2	R\$ 20.724.353,48	R\$ 38.322.731,48
6	23,1	R\$ 22.340.853,06	R\$ 60.663.584,54
7	23	R\$ 24.083.439,59	R\$ 84.747.024,13
8	22,89	R\$ 25.961.947,88	R\$ 110.708.972,01
9	22,79	R\$ 27.986.979,82	R\$ 138.695.951,83
10	22,69	R\$ 30.169.964,24	R\$ 168.865.916,08
11	22,58	R\$ 32.523.221,45	R\$ 201.389.137,53
12	22,48	R\$ 35.060.032,73	R\$ 236.449.170,26
13	22,38	R\$ 37.794.715,28	R\$ 274.243.885,54
14	22,28	R\$ 40.742.703,07	R\$ 314.986.588,61

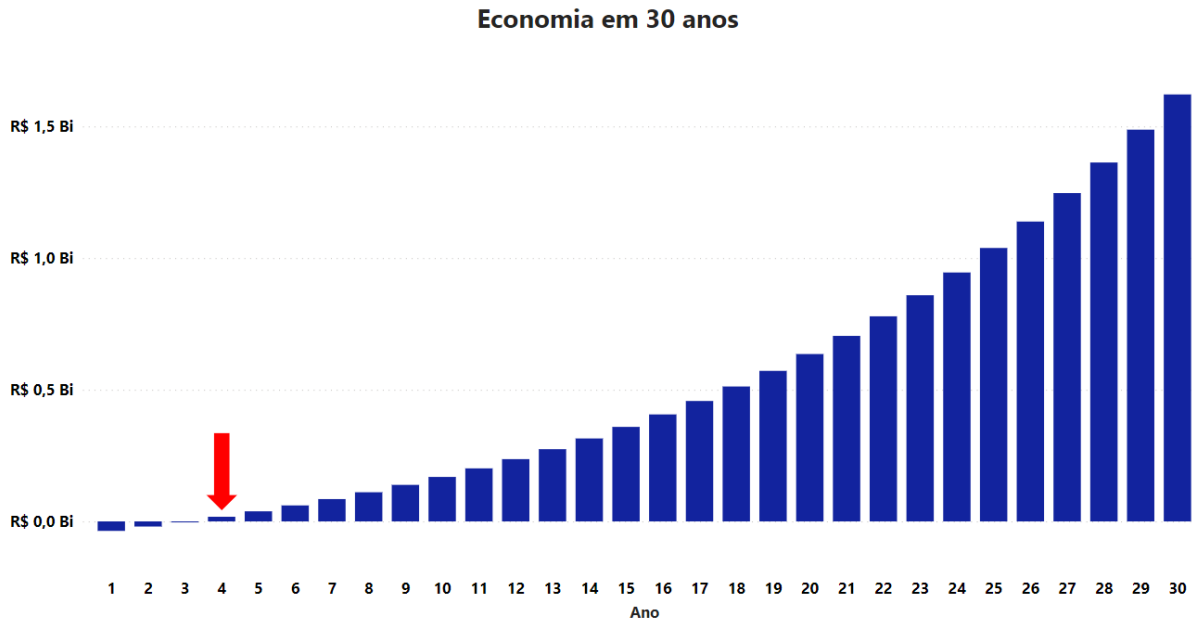
Continua na próxima página

Tabela 6 – Continuação da página anterior

Ano	Geração Anual (GWh)	Economia Anual (R\$)	Saldo Anual (R\$)
15	22,18	R\$ 43.920.633,91	R\$ 358.907.222,52
16	22,08	R\$ 47.346.443,36	R\$ 406.253.665,88
17	21,98	R\$ 51.039.465,94	R\$ 457.293.131,81
18	21,88	R\$ 55.020.544,28	R\$ 512.313.676,10
19	21,78	R\$ 59.312.146,74	R\$ 571.625.822,83
20	21,69	R\$ 63.938.494,18	R\$ 635.564.317,01
21	21,59	R\$ 68.925.696,73	R\$ 704.490.013,74
22	21,49	R\$ 74.301.901,07	R\$ 778.791.914,81
23	21,39	R\$ 80.097.449,36	R\$ 858.889.364,17
24	21,3	R\$ 86.345.050,40	R\$ 945.234.414,57
25	21,2	R\$ 93.079.964,34	R\$ 1.038.314.378,91
26	21,11	R\$ 100.340.201,55	R\$ 1.138.654.580,46
27	21,01	R\$ 108.166.737,28	R\$ 1.246.821.317,74
28	20,92	R\$ 116.145.767,15	R\$ 1.362.967.084,89
29	20,82	R\$ 124.641.713,88	R\$ 1.487.608.798,77
30	20,73	R\$ 133.759.130,60	R\$ 1.621.367.929,37

Fonte: O autor.

Na Figura 16, é demonstrado de forma gráfica a economia estimada pelo método de *Payback* simples.

Figura 16 – Resultado da análise de *Payback* simples

Fonte: O autor.

4.6.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é outro método utilizado para verificar a viabilidade financeira de um projeto a ser implementado. Ao utilizar este método, o intuito é encontrar uma taxa que quando aplicada ao fluxo de caixa do projeto, obtém-se Valor Presente Líquido (VPL) igual a 0. (WARREN, 2021). Para o cálculo da TIR, usa-se a equação 4.4.

$$VPL = Investimento + \sum_{t=1}^N \left(\frac{F_t}{(1+i)^t} \right) \quad (4.4)$$

Onde:

- VPL = valor presente líquido, em R\$;
- Investimento = valor inicial investido (sempre será negativo), em R\$;
- F = Fluxos de caixa, em R\$;
- t = tempo de investimento;
- i = taxa de juros do período;
- N = período final do investimento.

Com essa taxa estabelecida, deve-se comparar com uma taxa de Custo de Oportunidade do Capital (COC). Caso a TIR seja maior que o COC estabelecido, o projeto será viável. Entretanto, se a TIR apresente um valor inferior a COC estabelecida o empreendimento não é o melhor investimento a ser feito.

O método foi aplicado utilizando a linguagem *python* e após a otimização, encontrou-se uma TIR de 37,67%.

Utilizando a taxa SELIC, em vigor no período deste estudo, que se encontra no valor de 9,25% a.a., segundo (BACEN, 2021), como sendo a taxa COC e realizando uma comparação com a TIR encontrada, é perceptível que o projeto idealizado é viável e trará um bom retorno financeiro.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com a análise realizada foi possível perceber que as Áreas em Desertificação (AEDs) já ocupam 11% do território cearense. Desta forma, é imprescindível que seja realizado um projeto que utilize estas áreas e promova o desenvolvimento econômico e social.

Dito isso, foi observado que utilizar as AEDs para geração de energia elétrica seria uma boa opção para aproveitar estas áreas. Apesar do alto custo de instalação das usinas, estimado em 51,35 milhões de reais como demonstrado na Seção 4.5, o retorno financeiro acontece em um tempo inferior a quatro anos e a TIR calculada reafirma a viabilidade econômica visto que é superior a taxa SELIC que foi utilizada como COC.

Além disso, a utilização da linguagem *python* e o uso de dados georreferenciados mostraram-se excelentes ferramentas para se realizar um estudo envolvendo áreas geográficas que precisam ser combinadas.

Ademais, o uso da biblioteca *Folium* demonstrou ser bastante eficaz na montagem de mapas interativos com os dados totalmente estruturados. Os resultados são os mapas demonstrados nas Figuras 14 e 15. O mapa criado pode ser incorporado facilmente em *sites* e aplicativos por possuir uma extensão *HyperText Markup Language* (html).

Por fim, o intuito deste trabalho era proporcionar uma alternativa de melhoramento econômico e social para as AEDs. Diante do exposto, é possível perceber que utilizar essas áreas para geração de energia elétrica através da conversão fotovoltaica é uma boa opção para promover o desenvolvimento socioeconômico dessas regiões, além de ser uma ação muito positiva financeiramente para o Governo do Estado do Ceará.

Para trabalhos futuros, seria importante abordar temas que utilizem outros fatores de uso do terreno (Fu) definidos por métodos geográficos, utilizem métodos de previsão de consumo mensal, verifiquem a utilização das AEDs para geração solar para contemplar as UCs pertencentes ao grupo A e analisem outros métodos mais precisos de análise financeira considerando as novas mudanças legislativas. Com isso, sugere-se a abordagem das seguintes questões:

- Utilização de métodos geográficos para determinar o fator de uso do terreno (Fu);
- Utilização de métodos de previsão de consumo mensal;
- Verificar a aplicabilidade para UC's do grupo A;e
- Utilização de métodos financeiros mais precisos, considerando a Lei Federal nº

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Perspectivas para a Geração Centralizada Solar Fotovoltaica no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/artigos/perspectivas-para-a-geracao-centralizada-solar-fotovoltaica-no-brasil/>. Acesso em: 11 jan. 2022.
- AEASE. **DESERTIFICAÇÃO NO BRASIL**. 2017. Disponível em: <http://www.aease.org.br/?p=1359>. Acesso em: 12 jan. 2022.
- ANEEL. **Geração Distribuída**. 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 11 jan. 2022.
- ANEEL. **Postos Tarifários**. 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios>. Acesso em: 09 jan. 2022.
- ANEEL. **A tarifa de energia elétrica**. 2016. Disponível em: <http://aneel.gov.br/tarifas>. Acesso em: 09 jan. 2022.
- ARAÚJO, S. M. S. de. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **REVISTA RIOS ELETRÔNICA**, REVISTA RIOS ELETRÔNICA, v. 5, n. 5, p. 90–98, 2011.
- ASTERA. **Processo ETL e as etapas para sua implementação**. 2020. Disponível em: <https://www.astera.com/pt/type/blog/etl-process-and-steps/>. Acesso em: 12 jan. 2022.
- BACEN. **Taxas de juros básicas – Histórico**. 2021. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- BRASIL. **DECRETO Nº 2.741 DE 20 DE AGOSTO DE 1998, Diário Oficial da União: p.7**. Brasília, 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2741.htm. Acesso em: 22 dez. 2021.
- BRASIL, O. K. **O que faremos com os 40 trilhões de gigabytes de dados disponíveis em 2020?** 2017. Disponível em: <https://ok.org.br/noticia/o-que-faremos-com-os-40-trilhoes-de-gigabytes-de-dados-disponiveis-em-2020/>. Acesso em: 15 jan. 2022.
- CARVALHO, G. M. d. C. P. Estudo para redução de custos e previsão de faturas de energia elétrica para consumidores do grupo A do governo do estado do Ceará. 89 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/49691>. Acesso em: 05 out. 2021.
- CLARKE. **O que é matriz elétrica?** 2020. Disponível em: <https://clarke.com.br/matriz-eletrica/>. Acesso em: 05 jan. 2022.
- COSTA, A. **Desertificação avança no território cearense, alertam especialistas**. 2020. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/desertificacao-avanca-no-territorio-cearense-alertam-especialistas-1.2230739>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- ENEL. **Especificação Técnica no. 122**. Brasil, 2018.

- ENEL. **Taxas, Tarifas e Impostos**. 2020. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt-ceara/Tarifas_Enel.html. Acesso em: 20 jan. 2022.
- ENERGY, S. **Painel solar monocristalino**. 2020. Disponível em: <https://www.sine-energy.com/>. Acesso em: 09 jan. 2022.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2012 - Ano base 2011 - Síntese do Relatório Final**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- EPE. **BALANÇO COVID-19**. 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-500/Balanco_Covid-19%20-rev.pdf. Acesso em: 18 jan. 2022.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021 - Ano base 2020 - Síntese do Relatório Final**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- GOV.BR. **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022**. 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>. Acesso em: 11 fev. 2022.
- GREENER. **Estudo Estratégico de Geração Distribuída**. 2021. Disponível em: <https://greener.greener.com.br/estudo-gd-1s2021>. Acesso em: 15 jan. 2022.
- IBERDROLA. **O que é a desertificação? Saiba quais são suas causas e consequências**. 2021. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/desertificacao>. Acesso em: 12 jan. 2022.
- INNE. **O QUE É GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. 2018. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 11 jan. 2022.
- NBR-10899, A. **Energia solar fotovoltaica — Terminologia**. 2. ed. [S. l.], 2013.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2º. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. ISBN 9788517000898.
- PEREIRA, F. A. d. S.; OLIVEIRA, M. S. **Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica**. 2º. ed. [S. l.]: Publindústria, 2015. ISBN 978-989-723-082-0.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaico**. Rio de Janeiro, 2014.
- PORTALSOLAR. **Energia Solar Residencial**. 2016. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-residencial.html>. Acesso em: 05 jan. 2022.

PORTALSOLAR. **História e origem da Energia Solar**. 2016. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-origem-da-energia-solar.html>. Acesso em: 05 jan. 2022.

PORTALSOLAR. **Usina solar: todas as informações sobre a tecnologia no Brasil e no mundo**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html>. Acesso em: 05 jan. 2022.

RODRIGUES, M. I. V. A propensão À desertificação nos municípios do estado do ceará segundo os aspectos econômicos locais. Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural - SOBER, 45, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/5105>. Acesso em: 05 out. 2021.

RODRIGUES, M. I. V. Análise de impactos em Áreas propensas À desertificação em municípios do estado do ceará. Conferência Internacional: Clima, Sustentabilidade e Desenvolvimento em Regiões Semiáridas - ICID +18, 2., 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/5102>. Acesso em: 06 out. 2021.

SAS. **ETL- O que é e qual a sua importância**. 2018. Disponível em: https://www.sas.com/pt_br/insights/data-management/o-que-e-etl.html. Acesso em: 12 jan. 2022.

SCIENCE, S. D. **Cursos da comunidade Synapse Data Science**. 2021. Disponível em: <https://synapsedatascience.com.br/>. Acesso em: 15 out. 2021.

SOLAR, E. E. **Painel solar monocristalino e policristalino: entenda as diferenças e as vantagens de cada um**. 2019. Disponível em: <https://elysia.com.br/painel-solar-monocristalino-e-policristalino/>. Acesso em: 09 jan. 2022.

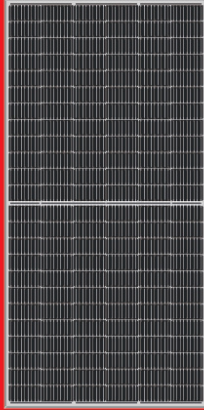
SPHINX. **Equal Area Cylindrical**. 2019. Disponível em: <https://proj.org/operations/projections/cea.html>. Acesso em: 15 out. 2021.

UNIFAL. **Dados Georreferenciados**. 2018. Disponível em: <https://www.unifal-mg.edu.br/geografia/node/29>. Acesso em: 12 jan. 2022.

WARREN. **Taxa Interna de Retorno (TIR): o que é, por que importa e como calcular**. 2021. Disponível em: <https://warren.com.br/magazine/taxa-interna-de-retorno-tir/>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ZILLES, R. e. a. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. ISBN 978-85-7975-052-6.


ANEXO A – DATASHEET - MÓDULO SOLAR



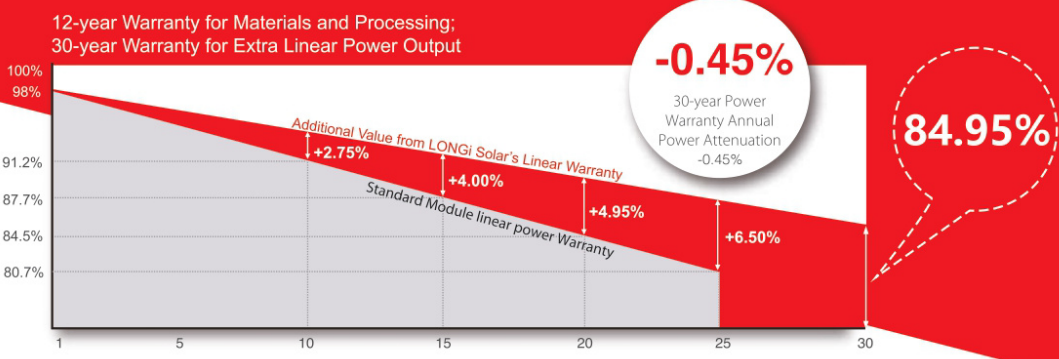
LR5-72HBD

520~540M

High Efficiency
Low LID Bifacial PERC with
Half-cut Technology



12-year Warranty for Materials and Processing;
30-year Warranty for Extra Linear Power Output



Complete System and Product Certifications

IEC 61215, IEC 61730, UL 61730
 ISO 9001:2008: ISO Quality Management System
 ISO 14001: 2004: ISO Environment Management System
 TS62941: Guideline for module design qualification and type approval
 OHSAS 18001: 2007 Occupational Health and Safety



* Specifications subject to technical changes and tests. LONGi Solar reserves the right of interpretation.

Front side performance equivalent to conventional low LID mono PERC:

- High module conversion efficiency (up to 21.1%)
- Better energy yield with excellent low irradiance performance and temperature coefficient
- First year power degradation <2%

Bifacial technology enables additional energy harvesting from rear side (up to 25%)

Glass/glass lamination ensures 30 year product lifetime, with annual power degradation < 0.45%, 1500V compatible to reduce BOS cost

Solid PID resistance ensured by solar cell process optimization and careful module BOM selection

Reduced resistive loss with lower operating current

Higher energy yield with lower operating temperature

Reduced hot spot risk with optimized electrical design and lower operating current

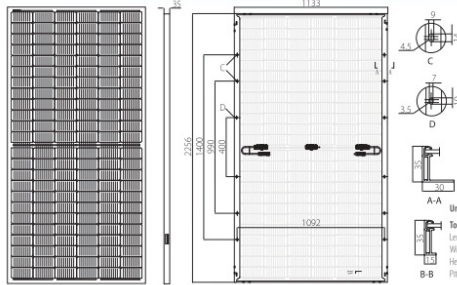


Room 801, Tower 3, Lujiazui Financial Plaza, No.826 Century Avenue, Pudong Shanghai, 200120, China
 Tel: +86-21-80162606 E-mail: module@longi-silicon.com Facebook: www.facebook.com/LONGi Solar

Note: Due to continuous technical innovation, R&D and improvement, technical data above mentioned may be of modification accordingly. LONGi have the sole right to make such modification at anytime without further notice; Demanding party shall request for the latest datasheet for such as contract need, and make it a consisting and binding part of lawful documentation duly signed by both parties.

LR5-72HBD 520~540M

Design (mm) Mechanical Parameters Operating Parameters



Cell Orientation: 144 (6x24)
 Junction Box: IP68, three diodes
 Output Cable: 4mm², 300mm in length,
 length can be customized
 Glass: Dual glass
 2.0mm coated tempered glass
 Frame: Anodized aluminum alloy frame
 Weight: 32.3kg
 Dimension: 2256x1133x35mm
 Packaging: 31pcs per pallet
 155pcs per 20'GP
 620pcs per 40'HC

Operational Temperature: -40 C ~ +85 C
 Power Output Tolerance: 0 ~ +5 W
 Voc and Isc Tolerance: ±3%
 Maximum System Voltage: DC1500V (IEC/UL)
 Maximum Series Fuse Rating: 30A
 Nominal Operating Cell Temperature: 45±2 C
 Safety Protection Class: Class II
 Fire Rating: UL type 3
 Bifaciality: 70±5%

Electrical Characteristics Test uncertainty for Pmax: ±3%

Model Number	LR5-72HBD-520M		LR5-72HBD-525M		LR5-72HBD-530M		LR5-72HBD-535M		LR5-72HBD-540M	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Testing Condition	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax/W)	520	388.3	525	392.1	530	395.8	535	399.5	540	403.3
Open Circuit Voltage (Voc/V)	48.90	45.75	49.05	45.89	49.20	46.03	49.35	46.17	49.50	46.31
Short Circuit Current (Isc/A)	13.57	10.97	13.65	11.03	13.71	11.08	13.78	11.14	13.85	11.19
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	41.05	38.27	41.20	38.41	41.35	38.55	41.50	38.69	41.65	38.83
Current at Maximum Power (Imp/A)	12.67	10.15	12.75	10.21	12.82	10.27	12.90	10.33	12.97	10.39
Module Efficiency(%)	20.3		20.5		20.7		20.9		21.1	
STC (Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m ² , Cell Temperature 25 C, Spectra at AM1.5										
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800W/m ² , Ambient Temperature 20 C, Spectra at AM1.5, Wind at 1m/s										

Electrical characteristics with different rear side power gain (reference to 530W front)

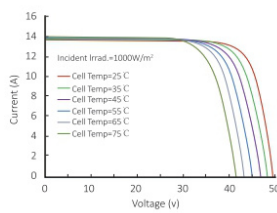
Pmax /W	Voc/V	Isc /A	Vmp/V	Imp /A	Pmax gain
557	49.20	14.40	41.35	13.46	5%
583	49.20	15.08	41.35	14.10	10%
610	49.30	15.77	41.45	14.74	15%
636	49.30	16.46	41.45	15.38	20%
663	49.30	17.14	41.45	16.02	25%

Temperature Ratings (STC) Mechanical Loading

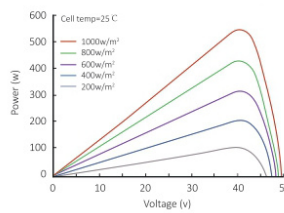
Temperature Coefficient of Isc	+0.050%/C	Front Side Maximum Static Loading	5400Pa
Temperature Coefficient of Voc	-0.284%/C	Rear Side Maximum Static Loading	2400Pa
Temperature Coefficient of Pmax	-0.350%/C	Hailstone Test	25mm Hailstone at the speed of 23m/s

I-V Curve

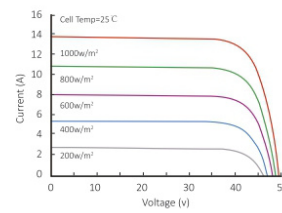
Current-Voltage Curve (LR5-72HBD-530M)



Power-Voltage Curve (LR5-72HBD-530M)



Current-Voltage Curve (LR5-72HBD-530M)



Room 801, Tower 3, Lujiazui Financial Plaza, No.826 Century Avenue, Pudong Shanghai, 200120, China
 Tel: +86-21-80162606 E-mail: module@longi-silicon.com Facebook: www.facebook.com/LONGI Solar

Note: Due to continuous technical innovation, R&D and improvement, technical data above mentioned may be of modification accordingly. LONGI have the sole right to make such modification at anytime without further notice; Demanding party shall request for the latest datasheet for such as contract need, and make it a consisting and binding part of lawful documentation duly signed by both parties.