



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**Análise Técnica e Econômica de um Sistema
Fotovoltaico Conectado à Rede**

**Autor: Edson Thiago Nascimento de Jesus
Orientador: Prof.^a Paula Meyer Soares**

**Brasília, DF
2018**



Edson Thiago Nascimento de Jesus

Análise Técnica e Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof.^a Dra. Paula Meyer Soares

**Brasília, DF
2018**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Jesus, Edson Thiago Nascimento de.

Análise Técnica e Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede / Edson Thiago Nascimento de Jesus. Brasília: UnB, 2013. 65 p. : il. ; 30 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2018. Orientação: Paula Meyer Soares.

1. Energia. 2. Sistema Fotovoltaico. 3. Dimensionamento I. Soares, Paula. M. II. Análise Técnica e Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.

CDU Classificação



Análise Técnica e Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Edson Thiago Nascimento de Jesus

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação ___/___/2018) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof.^a Dra. Paula Meyer Soares, UnB/ FGA

Orientador

Prof. Dr. Fernando Paiva Scardua, UnB/ FGA

Membro Convidado

Prof. Dr. Alex Reis, UnB/ FGA

Membro Convidado

Brasília, DF
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela conclusão de mais uma etapa da minha vida.

Agradeço aos meus Pais por tudo que fizeram por mim, pelos incentivos aos estudos desde a minha infância.

Agradeço aos meus irmãos, aos meus familiares, amigos e minha namorada que sempre estão ao meu lado.

Agradeço a todos meus professores, desde a alfabetização até a Faculdade, pelos ensinamentos que levo até hoje em minha vida.

Agradeço a minha professora Orientadora Paula Meyers pela atenção e carinho que teve comigo ao me orientar.

Agradeço a todos funcionários, técnicos e ao pessoal da secretaria da FGA, que sempre foram muito solícitos comigo.

Agradeço as minhas Avós (IN MEMORIAN) que sempre estarão vivas dentro de mim. Eu consegui, Vó. Eu amo vocês.

Enfim, agradeço a todos que fazem parte da minha vida e que contribuíram para realizar um dos meus sonhos: ser o primeiro engenheiro da família.

RESUMO

O Brasil possui um grande potencial solar que ainda não é bem explorado para gerar eletricidade. Países como Alemanha e Espanha com radiação solar menores comparados ao Brasil são mais eficientes no aproveitamento solar, onde possuem incentivos governamentais em relação ao uso da fonte solar. Para impulsionar o uso das fontes renováveis no Brasil, entrou em vigor a Resolução Normativa 482/2012 revisada pela REN nº 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em que o consumidor pode gerar sua própria energia utilizando uma fonte renovável, entre elas a solar, conectado na rede da Distribuidora. Segundo a ANEEL, 99% das instalações conectadas na rede são solar fotovoltaica, sendo 79,5% residencial. Este presente trabalho dimensionou um sistema fotovoltaico para três prédios funcionais, levando em consideração somente seu consumo e não de seus moradores, onde o excesso da energia gerada poderá beneficiar outros prédios de mesma titularidade. Foi feita a análise econômica do sistema fotovoltaico proposto utilizando indicadores financeiros (TIR, VPL e Payback) para comprovar a viabilidade do projeto em estudo, assim como o seu resultado e conclusão.

Palavras-chave: radiação solar, aproveitamento solar, incentivos governamentais, sistema fotovoltaico, dimensionamento.

ABSTRACT

Brazil has a great solar potential that is not yet well exploited to generate electricity. Countries such as Germany and Spain have shown that solar energy systems are faster and without solar utilization, where government incentives regarding the use of the solar source. In order to boost the use of renewable sources in Brazil, Normative Resolution No. 482/2012 revised by REN No. 687/2015 of the National Electric Energy Agency (ANEEL) came into force. , among them a solar, connected in the network of the Distributor. According to ANEEL, 99% of the installations connected in the network are solar photovoltaic, being 79.5% residential. This present work dimensioned the photovoltaic for three prediction the siring, taking emued their memory and their own memory, where the surplus of the generated may behavior of the prosed the same tenure. An economic analysis of the photovoltaic system was made using the financial indicators (TIR, VPL and Payback) to prove the feasibility of the project under study, as well as its result and conclusion.

Keywords: solar radiation, solar exploitation, governmental inventions, photovoltaic system, sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil.....	1
Figura 2 – Espectro Eletromagnético.....	4
Figura 3 – Movimento da Terra e as estações do ano.....	5
Figura 4 – Ângulos Solares.....	6
Figura 5 – Radiações incidentes sobre uma Placa Fotovoltaica.....	7
Figura 6 – Irradiância solar ao longo de um dia.....	8
Figura 7 – Média Anual de Insolação diária no Brasil.....	9
Figura 8 – Mapa Mundial de Radiação Solar Global.....	10
Figura 9 – Mapa da Radiação Solar Global no Brasil.....	11
Figura 10 – Mapa da Radiação Solar Global na Alemanha.....	12
Figura 11 – Mapa da Radiação Solar Global na Espanha.....	13
Figura 12 – Processo de extração do Silício a Painel Fotovoltaico.....	14
Figura 13 – Cadeia Produtiva da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.....	15
Figura 14 – Fabricantes Nacionais e Internacionais da Cadeia Produtiva Solar Brasileira.....	16
Figura 15 – Efeito Fotovoltaico.....	17
Figura 16 – Sistema de Tarifação net metering.....	20
Figura 17 – Numero de micro e minigeração distribuída.....	21
Figura 18 – Conexões por tipo de fonte.....	22
Figura 19 – Classe de consumo de consumidores.....	22
Figura 20 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.....	24
Figura 21 – Painel Fotovoltaico Policristalino Canadian Solar CS6K-270P....	26
Figura 22 – Inversor Fronius On-Grid 6 kW.....	29
Figura 23 – Painéis Solares conectado a um microinversor.....	29
Figura 24 – String Box CC-CA.....	31
Figura 25 – Conectores MC4 macho e fêmea.....	32
Figura 26 – Vista aérea dos Blocos D, G e K.....	36
Figura 27 – Irradiação solar média para o local de estudo.....	36
Figura 28 – Curva I x V em função da irradiância e temperatura.....	40

Figura 29 – Localização do norte geográfico no local de estudo.....	44
Figura 30 – Orientação dos painéis solares no Bloco D.....	45
Figura 31 - Preço médio residencial por potência do gerador solar.....	
Figura 32 - Desempenho das aplicações financeiras em 2017.....	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de Geração Fotovoltaica em telhados.....	23
Tabela 2 – Área dos Blocos D, G e K.....	35
Tabela 3 – Consumo médio dos Blocos D, G e K.....	36
Tabela 4 – Preços dos Painéis Fotovoltaicos.....	38
Tabela 5 – Dados do painel CS6K-270P.....	39
Tabela 6 – Especificações Elétricas por tipo de funcionamento.....	39
Tabela 7 – Número de painéis para as duas situações.....	42
Tabela 8 – Potência de Pico para o Sistema Fotovoltaico.....	43
Tabela 9 – Área necessária para instalação dos painéis Canadian Solar CS6K-270P.....	43
Tabela 10 – Especificações do Inversor Fronius Primo 6 kW.....	47
Tabela 11 – Especificações do Inversor Fronius Primo 6 kW.....	47
Tabela 12 – Consumo de energia elétrica dos Blocos D, G e K em kwh/mês.....	52
Tabela 13 – Dados do Bloco D.....	53
Tabela 14 – Custo de Instalação para potência de 1,62 kW.....	53
Tabela 15 – Dados do Bloco G.....	53
Tabela 16 – Custo de Instalação para potência de 2,43 kW.....	54
Tabela 17 – Dados do Bloco K.....	54
Tabela 18 – Custo de Instalação para potência de 1,35 kW.....	54
Tabela 19 – Dados do Bloco D+G+K.....	55
Tabela 20 – Custo de Instalação para potência de 5,4 kW.....	55
Tabela 21 – Custo unitário do sistema fotovoltaico por watt pico.....	56
Tabela 22 – Custo anual de energia para os três Blocos.....	58
Tabela 23 – Economia anual gerada pelo sistema fotovoltaico.....	59

Tabela 24 – Análise financeira para o cenário 1.....	62
Tabela 25 – Análise financeira para o cenário 2.....	63
Tabela 26 – Análise financeira para o cenário 4.....	64

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
CA	Corrente Contínua
CC	Corrente Alternada
CEB	Companhia Energética de Brasília
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
DTH	Distorção Harmônica Total
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FIT	Feed in Tariff
IEC	International Electrotechnical Commission
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
NOCT	Normal Operation Cell Temperature
PROGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
STC	Standard Test Conditions
SFV	Sistema Fotovoltaico

LISTA DE SÍMBOLOS

A_N	Área Necessária de Instalação dos painéis [m ²]
A_P	Área da Superfície do painel [m ²]
E_{pr}	Energia produzida pelo painel [Wh]
E_{painel}	Energia produzida por um painel no mesmo intervalo de tempo [kWh]
E_S	Insolação diária [Wh/m ² /dia]
E_{sistema}	Energia produzida pelo sistema no intervalo de tempo [kWh]
N_{max}	Número máximo de painéis por string
N_p	Número de painéis da instalação fotovoltaica
P_p	Potência do painel Fotovoltaico [W]
PI	Potência Instalada [Wp]
V_{max}	Máxima tensão de entrada [V]
V_{oc}	Tensão de circuito aberto do painel [V]
η_{max}	Eficiência do painel [%]

Sumário

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SIGLAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	11
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. METODOLOGIA	3
3. REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 Radiação Solar	5
3.1.1 Movimentação da Terra	5
3.1.2 Ângulos Solares	6
3.1.3 Tipos de Radiação Solar	7
3.1.4 Irradiância	8
3.1.5 Insolação	9
3.1.6 Irradiação Solar Brasileira x Irradiação Solar no Mundo	10
3.2 Cadeia Produtiva da Energia Solar	13
3.2.1 O Silício	13
3.2.2 Célula Fotovoltaica	16
3.3 Geração Distribuída	18
3.3.1 Legislação	18
3.3.2 Sistema de Compensação	19
3.3.3 Resultado da Geração Distribuída	20
3.2 Sistemas Fotovoltaicos	24
3.4.1 Painel Fotovoltaico	25
3.4.2 Inversor	27
3.4.2.1 Microinversor	29
3.4.3 Caixa de <i>Strings</i> ou <i>String Box</i>	29
3.4.4 Conectores	30
3.4.5 Perdas no Sistema Fotovoltaico	31
3.4.6 Medidor Bidirecional	32
3.4.7 Normas para o Sistema Fotovoltaico	32
4 ESTUDO DE Caso	35
4.1 LOCAL DE ESTUDO	35
4.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	36
4.3 POTENCIAL SOLAR DE BRASÍLIA	37
4.4 Dimensionamento fotovoltaico	38
4.4.1 Escolha do painel fotovoltaico	38
4.4.2 Produção de Energia pelo painel Canadian Solar CS6K-270P	40
4.4.3 Dimensionando o número de painéis no Sistema Fotovoltaico	41
4.4.4 Potência Instalada do Sistema Fotovoltaico (Wp)	42
4.4.6 Área de telhado do Sistema Fotovoltaico	44
4.4.7 Orientação dos painéis Fotovoltaicos	45
4.4.8 Dimensionamento do Inversor	46

5. Análise Econômica	49
5.1 Análise de Custo e Consumo de Energia Elétrica de cada Bloco	49
5.1.1 Bloco D.....	50
5.1.2 Bloco G.....	50
5.1.3 Bloco K.....	51
5.1.4 Bloco D+G+K	52
5.2 Geração e Custo da Energia Solar Fotovoltaica	53
5.3 Cálculo da energia economizada com o sistema fotovoltaico em 1 ano.	55
5.4 Financiamento da Energia Solar Fotovoltaica.....	56
5.4.1 Fundo Clima (BNDES)	56
5.4.2 CDC Socioambiental Santander	57
5.4.3 Caixa Econômica Federal	57
5.5 Determinação da viabilidade do Projeto.....	57
5.5.1 Taxa Interna de Retorno	58
5.5.2 Valor Presente Líquido	58
5.5.3 Payback.....	58
5.5.4 Resultados Encontrados.....	59
6. CONCLUSÃO.....	62
7. Bibliografia.....	64

1. INTRODUÇÃO

No mundo atual, a dependência da eletricidade pela sociedade e a preocupação com meio ambiente tem dado oportunidade aos países em adotar políticas de incentivo as energias renováveis. O uso das fontes renováveis para produzir eletricidade substituindo os combustíveis fósseis reduz a emissão de poluentes na atmosfera e reduz o chamado efeito estufa, responsável pela elevação da temperatura do planeta e por diversas mudanças climáticas observadas em todo globo terrestre [1]. A matriz energética brasileira tem quase toda eletricidade produzida por fonte hidráulica conforme a figura 1. Apesar de ser uma fonte limpa, a energia hidrelétrica nos últimos anos passa por um grave problema devido as estiagens que afetam diretamente os níveis dos reservatórios em todo país ocasionando o uso das usinas termelétricas que utilizam combustíveis fósseis, derivados de petróleo e carvão que contribuem para o efeito estufa e encarecem o preço final da energia.

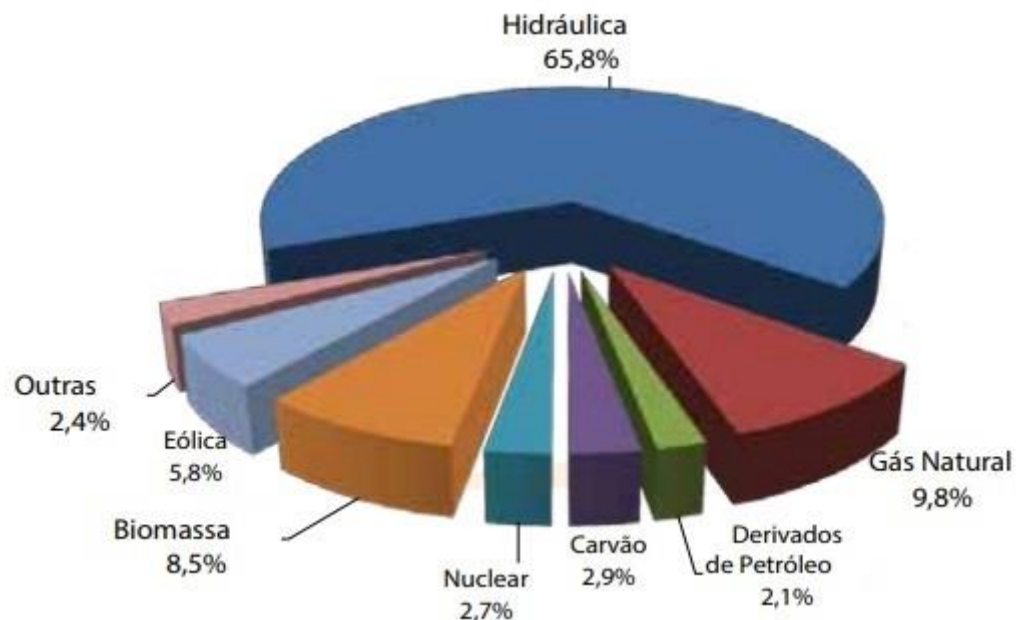


Figura 1 – Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil [2]

Com esse cenário, a energia fotovoltaica (FV) vem ganhando mais espaço no mercado energético brasileiro. Os elevados índices de radiação solar no Brasil têm

contribuído na descentralização da geração de energia que é hoje é predominantemente da energia hidrelétrica. O Brasil possui um enorme potencial para a geração de energia solar durante todo o ano, o valor máximo e mínimo de irradiação global são respectivamente 6,5 kWh/m² e 4,25 kWh/m². Os valores de irradiação solar global em qualquer parte territorial do Brasil (1500-2500 kWh/m²) são maiores quando comparados a países como Alemanha (900-1250 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²) [3].

A geração de energia elétrica utilizando a radiação solar pode ser por heliotermia (*Concentrated Solar Power - CSP*) e pelo efeito fotovoltaico. A heliotermia a geração de eletricidade é dada pela conversão da energia solar em energia térmica, em seguida em energia mecânica e finalmente em energia elétrica. O efeito fotovoltaico usa a radiação solar que incide nos semicondutores e consequentemente geram corrente contínua que serão transformadas em corrente alternada com auxílio de um inversor [4].

O uso do sistema fotovoltaico, que podem ser usados nos telhados residenciais, ainda precisa de apoio governamental, seja na redução de impostos ou juros menores para financiamentos fotovoltaicos para poder viabilizar essa fonte energética. Para impulsionar o uso de fontes renováveis, incluindo a solar, entrou em vigor a Resolução Normativa n° 482/2012 que foi revisada pela REN n° 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabelecendo regras para microgeração e minigeração para que os consumidores possam gerar sua própria energia e trocando o excedente por créditos que darão descontos em suas contas de luz futura [5].

Neste trabalho, o sistema fotovoltaico será conectado na rede elétrica da distribuidora (CEB), conforme a Resolução Normativa ANEEL n° 687/15, e será feito um dimensionamento para implementação do sistema fotovoltaico e sua viabilidade econômica.

1.1. OBJETIVO GERAL

- Realizar estudo de dimensionamento técnico e de viabilidade econômica de um dado sistema fotovoltaico conectado à rede de três prédio funcionais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

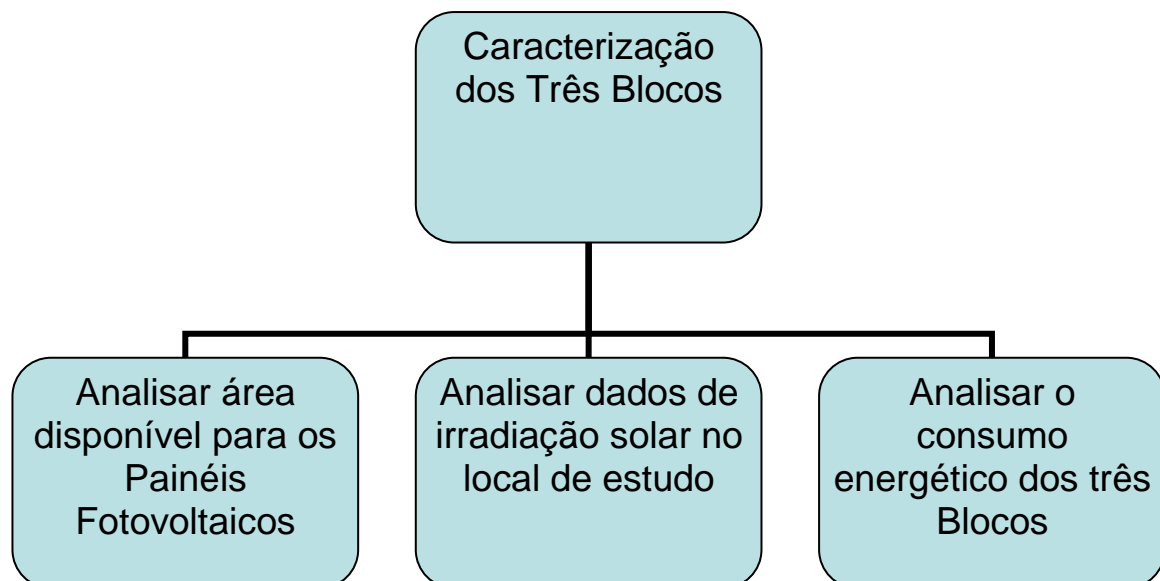
- Descrever os principais elementos que compõe o sistema fotovoltaico: painéis fotovoltaicos, inversores, cabos, *string box*...
- Analisar os dados de irradiação solar de Brasília.
- Apresentar estudo para sistema fotovoltaico para três prédios funcionais analisando: dados de consumo de energia elétrica, área disponível de telhado, dimensionamento de inversor, produção de energia por painel fotovoltaico.
- Efetuar a análise econômica do sistema fotovoltaico proposto

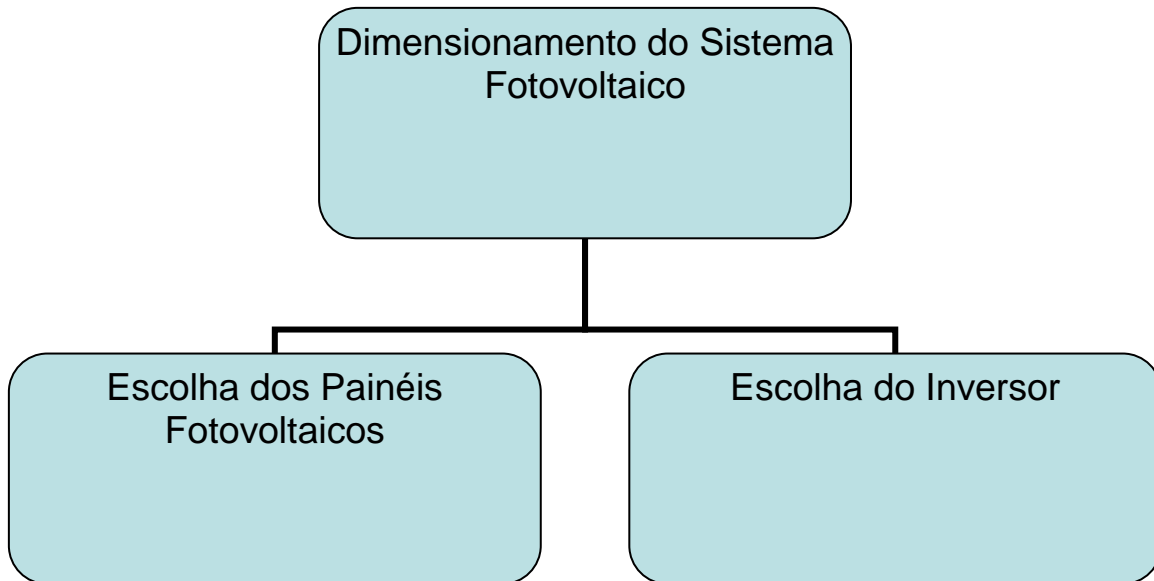
2. METODOLOGIA

O presente trabalho constitui uma revisão bibliográfica, obtida a partir de material já elaborado, principalmente de livros e artigos. Trata-se de um estudo exploratório, aprofundando os conhecimentos a respeito de um determinado tema.

As formulas utilizada nesse trabalho foram mostradas no texto.

O fluxograma a seguir, mostra como será feito o trabalho de dimensionamento:





O trabalho está dividido em quatro capítulos conforme descrito abaixo:

- No capítulo 1 foi feita uma introdução sobre o tema de estudo e seus objetivos estabelecidos para este trabalho.
- No capítulo 2 é apresentada a metodologia utilizada no trabalho para cada etapa executada para chegar ao objetivo apresentado.
- O capítulo 3 é composto pelo referencial teórico, onde são apresentados conceitos desenvolvidos sobre o tema de estudo. Foram contextualizados a radiação solar, a cadeia produtiva da energia fotovoltaica, geração distribuída, as perdas relacionadas ao sistema fotovoltaico, normas e conceitos de sistema fotovoltaicos.
- O capítulo 4 aborda o estudo feito nos três prédios, analisando o consumo de energia elétrica através das contas de energia disponibilizada; os dados de irradiância solar local retirados pelo Programa SunData no site da CRESCEB; a escolha de painéis fotovoltaicos pelo melhor custo por potência (\$/W), a inclinação e orientação dos painéis, área de telhado disponível para o sistema fotovoltaico e dimensionamento do inversor foram feitas utilizando o Programa Helioscope.
- O capítulo 5 aborda como foi realizada a análise econômica do sistema fotovoltaico de estudo, mostrando os procedimentos utilizados para comprovar a viabilidade do projeto. Foram utilizados três métodos (TIR, VPL e Payback) para análise da rentabilidade.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é a energia emitida pelo sol, por meio dos fótons. Os fótons se propagam no espaço a velocidade da luz e como ondas eletromagnéticas. Essas ondas podem ser caracterizadas pelo comprimento ou pela frequência, ou seja, quanto maior a frequência da onda, maior é a quantidade de energia nos fótons e quanto maior a energia, menor seu comprimento de onda [6]. A energia irradiada pelo sol cobre uma grande faixa do espectro eletromagnético, conforme a figura 2. Cerca de 81% da energia que chega ao sistema Terra/Atmosfera está numa faixa de comprimento de onda que vai do visível ao infravermelho [6].

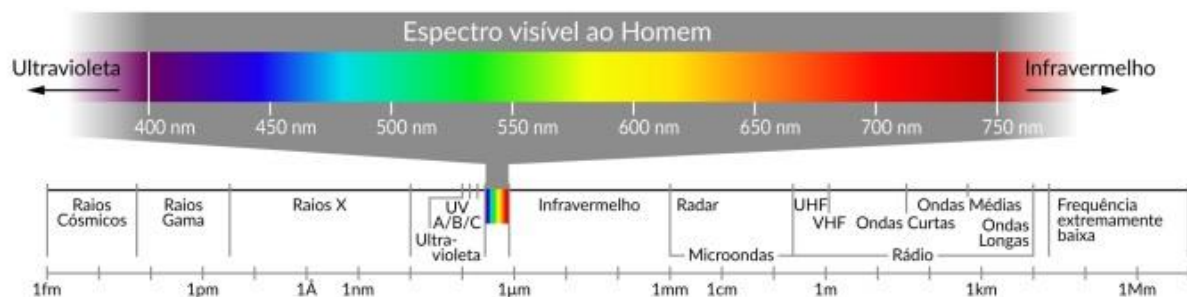


Figura 2 – Espectro Eletromagnético [7]

A terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros em um ciclo a cada 365,25 dias solares, em todo período a distância varia de $1,74 \times 10^8$ km e $1,52 \times 10^8$ km, o fluxo de radiação solar fica oscilando entre 1.325 W/m^2 e 1.412 W/m^2 [6].

3.1.1 Movimentação da Terra

O planeta Terra executa o movimento de translação, em volta do sol, e o de rotação, em volta do seu próprio eixo, como mostra a figura 3. No movimento de translação tem um trajeto completo com duração de 365 dias e seis horas, porém de quatro em quatro anos tem-se um ano bissexto, que possui um dia a mais pela diferença de seis horas entre o ano real e o ano do calendário, correspondendo uma

volta completa da Terra em torno do sol. O movimento de rotação dura 24 horas e se dá no sentido anti-horário, do leste para o oeste. O eixo de rotação da Terra, que é o eixo dos polos sul e norte geográficos tem uma inclinação de $23,5^\circ$ com relação ao eixo do movimento da órbita de translação [1].



Figura 3 – Movimento da Terra e a estações do ano [11]

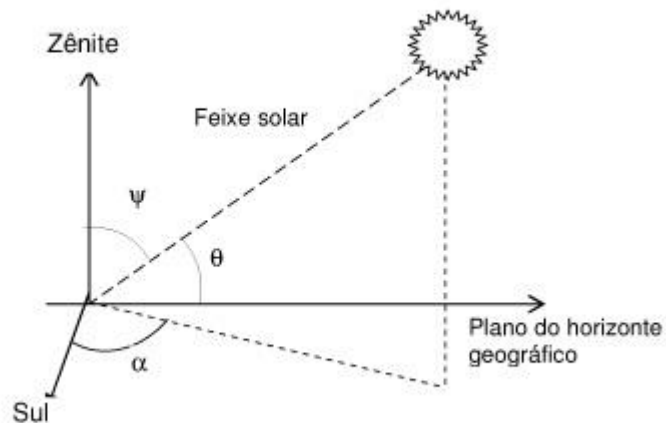
Os Solstícios e Equinócios modificam a exposição do globo terrestre em relação a radiação vinda do sol. Os solstícios são épocas onde o hemisfério norte e sul são desigualmente iluminados. No verão os dias são mais longos que as noites (Solstícios de Verão) e as noites são mais longas que os dias (Solstícios de inverno). Em épocas de Equinócios, os hemisférios sul e norte são iluminados igualmente sendo a duração dos dias e noites iguais nesses dois hemisférios [19].

3.1.2 Ângulos Solares

Quando se fala em energia solar, alguns ângulos devem ser considerados, conforme a figura 4. As relações geométricas entre os raios solares, que variam com o movimento do sol e superfícies da terra são apresentadas por vários ângulos a seguir:

- **Ângulo Azimutal:** é o ângulo entre o sol e a linha que liga o norte a sul, conforme a figura 4. Quando o sol está exatamente acima da linha, o ângulo é nulo, chamado de meio dia solar. E o ângulo vai variando conforme os horários do dia [18].

- Ângulo Zenital: depende da altura do sol, o seu ângulo varia conforme os dias do ano. [1].
- Ângulo de Incidência: ângulo formado entre os raios solares e a normal à superfície de captação, quanto menor for esse ângulo, mais energia será captada [19].
- Ângulo da Altura Solar: ângulo entre os raios solares e sua projeção sobre um plano horizontal [19].
- Ângulo de inclinação: ângulo entre o painel solar fotovoltaico e o plano horizontal [19].
- Declínio Solar: ângulo dos raios solares com relação ao plano do equador, é consequência da inclinação do eixo de rotação da terra e variam de acordo com a posição do sol em todo ano [1].



Ângulos zenital (ψ), de elevação (θ) e azimutal (α) do Sol.

Figura 4 – Ângulo Solares [18]

3.1.3 Tipos de Radiação Solar

A radiação solar que incide numa superfície pode ser difusa, direta e refletida e global, conforme a figura 5:

- Radiação Difusa: radiação de todas as direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados na atmosfera. É a fração que atravessa a atmosfera mudando a direção.
- Radiação Direta: direção da incidência na linha imaginária entre a superfície e o sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorre na atmosfera. É a fração da radiação solar que atravessa a atmosfera e chega na superfície.
- Radiação Refletida (Albedo): parcela de radiação que atinge o corpo absorvedor após ser refletido pelo solo e objetos próximos.
- Radiação Global: é a soma da radiação difusa e direta.

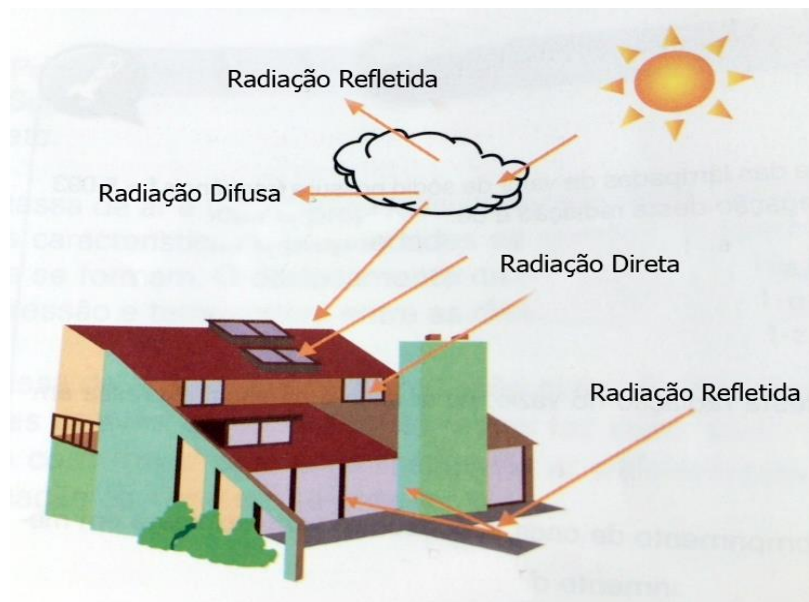


Figura 5 – Radiações Incidentes sobre uma Placa Fotovoltaica [8]

3.1.4 Irradiância

É empregada para quantificar a radiação solar, sua unidade é o W/m^2 (watt por metro quadrado). É uma unidade de potência por área e como a potência expressa a energia transportada num certo intervalo de tempo, pode-se dizer que quanto maior a potência da radiação solar, mais energia é transportada num determinado intervalo de tempo. Na superfície da terra a irradiância solar gira em torno de $1000 W/m^2$, já no espaço extraterrestre a irradiância está em torno de $1353 W/m^2$. Essa irradiância de $1000 W/m^2$ é padrão na indústria fotovoltaica para especificar e avaliar módulos e células fotovoltaicas. Assim como a medida da

irradiância, em W/m^2 , é usada para avaliar a eficiência dos dispositivos e sistemas fotovoltaicos [1].

Na figura 6, mostra a irradiância solar durante um dia. A cada instante de tempo são realizadas medidas, onde calculando a área embaixo da curva, é obtido o valor da energia recebida do sol durante todo dia por unidade de área, sendo chamado de insolação.

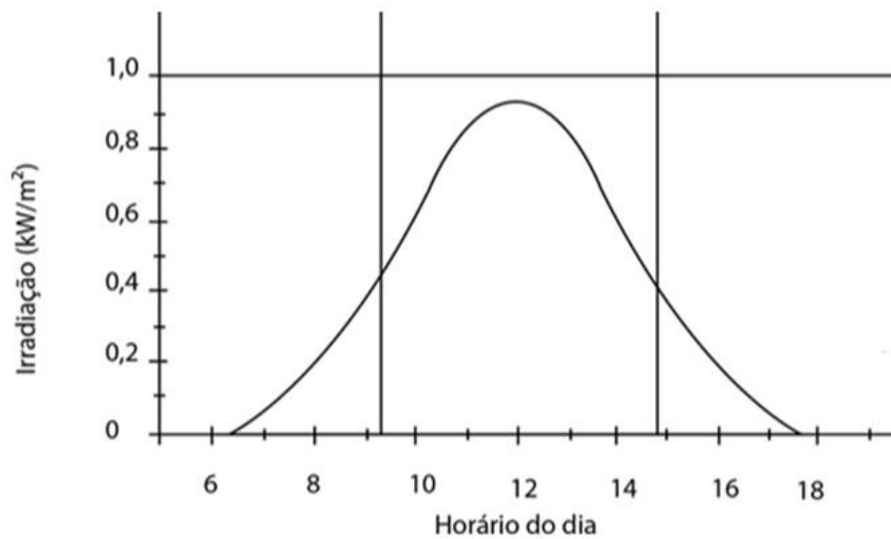


Figura 6 – Irradiância solar ao longo de um dia [10]

3.1.5 Insolação

É usada para expressar a energia solar que incide sobre uma área de superfície plana em um determinado intervalo de tempo. Tem como unidade o Wh/m^2 (watt-hora por metro quadrado), sendo o watt-hora uma unidade física de energia e o watt-hora por metro quadrado a densidade de energia por área. A medida de insolação em Wh/m^2 é muito usada para dimensionamento fotovoltaico e muito encontrado em mapas de insolação que fornecem os valores diários em $Wh/m^2.dia$, conforme a figura 7 [1].

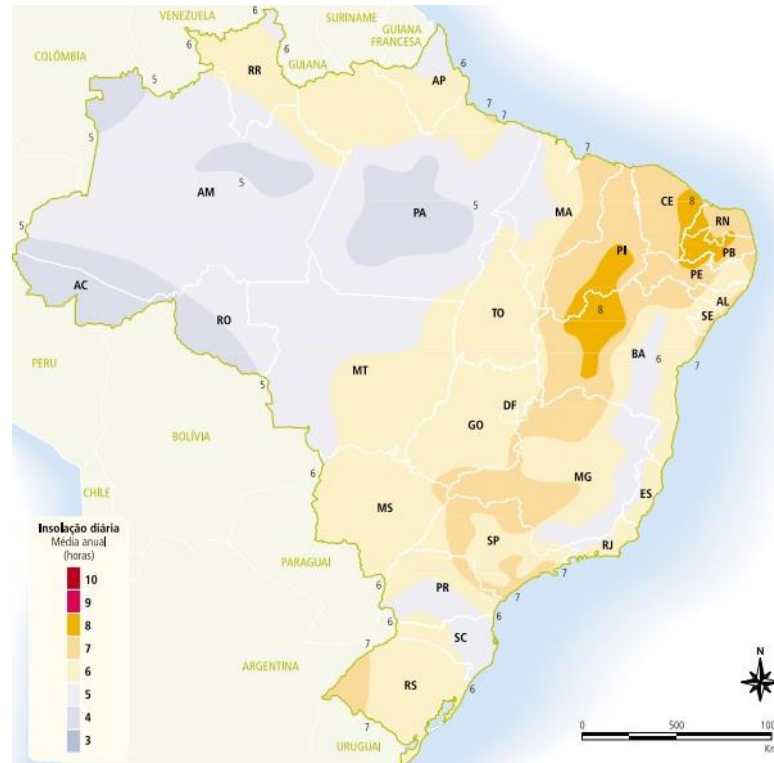


Figura 7 – Média Anual de Insolação diária no Brasil (horas) [11]

3.1.6 Irradiação Solar Brasileira x Irradiação Solar no Mundo

A medição da radiação solar (direta, difusa ou global) na superfície terrestre é de grande importância para os estudos das condições climáticas e atmosféricas para o desenvolvimento de projetos para a captação e conversão da energia solar [20]. As medições são feitas com Pireliômetro, instrumento que faz a medição da radiação Direta e com Piranometro, instrumento que faz medição de radiação Global. Os dados de satélites geoestacionários e dados climatológicos, coletados nas estações de superfícies são importantes para mapear o potencial energético do país. A figura 8 mostra o mapa mundial da radiação solar global, que é a soma das radiações direta e difusa. O estudo de viabilidade de uma determinada região para sistemas fotovoltaicos é possível através dessas informações. Nota-se na figura que as regiões desérticas que há no mundo são as mais beneficiadas de recurso solar.

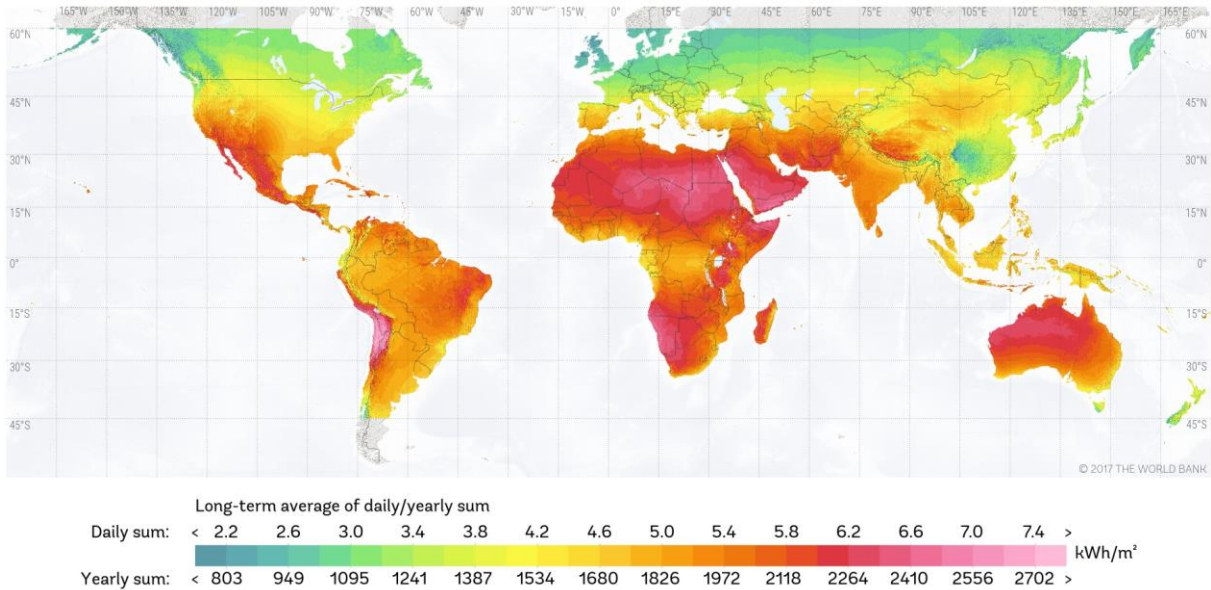


Figura 8 – Mapa Mundial de Radiação Solar Global [21]

A figura 9 mostra a média anual total diário de irradiação solar global que incide em todo território brasileiro, observa-se que apesar das características diferentes do clima no país, a média anual da radiação global tem boa uniformidade e altas médias anuais em todo Brasil. Na figura, observa-se que na região Nordeste (5 a 6 kWh/m²) e uma parte de Minas Gerais (4 a 6 kWh/m²) é que estão os melhores índices de radiação solar global e que na região sul (4 a 5 kWh/m²) estão os menores índices de radiação global. Os valores de radiação global que incide em qualquer parte do Brasil (1500 a 2500 kWh/m²) são maiores quando comparados ao da Alemanha (900 a 1250 kWh/m²), conforme a figura 10, e Espanha (900 a 1900 kWh/m²), na figura 11, países onde os projetos que aproveitam os recursos solares são amplamente disseminados e contam com incentivo governamental.

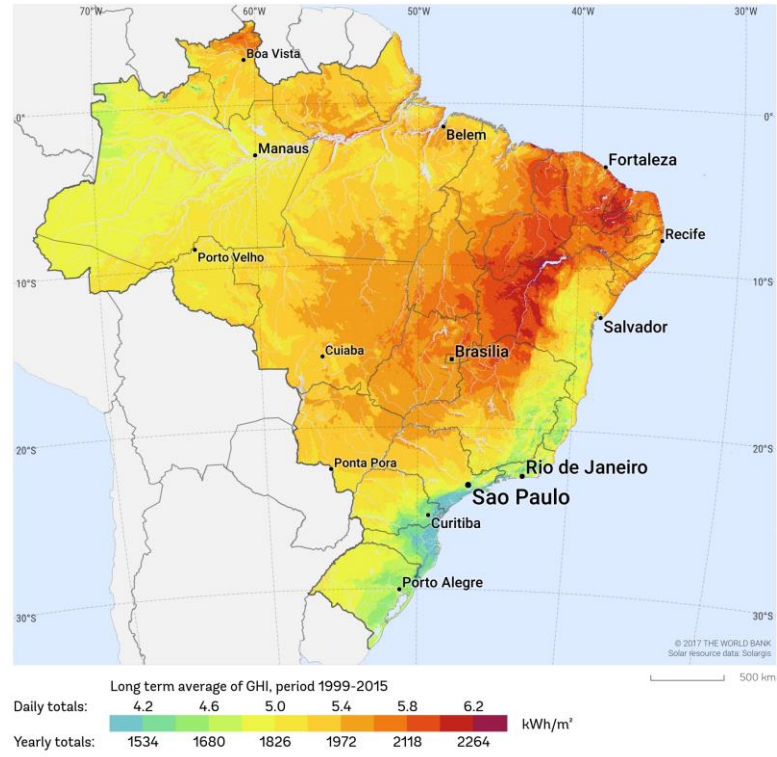


Figura 9 – Mapa da Radiação Solar Global no Brasil [21]

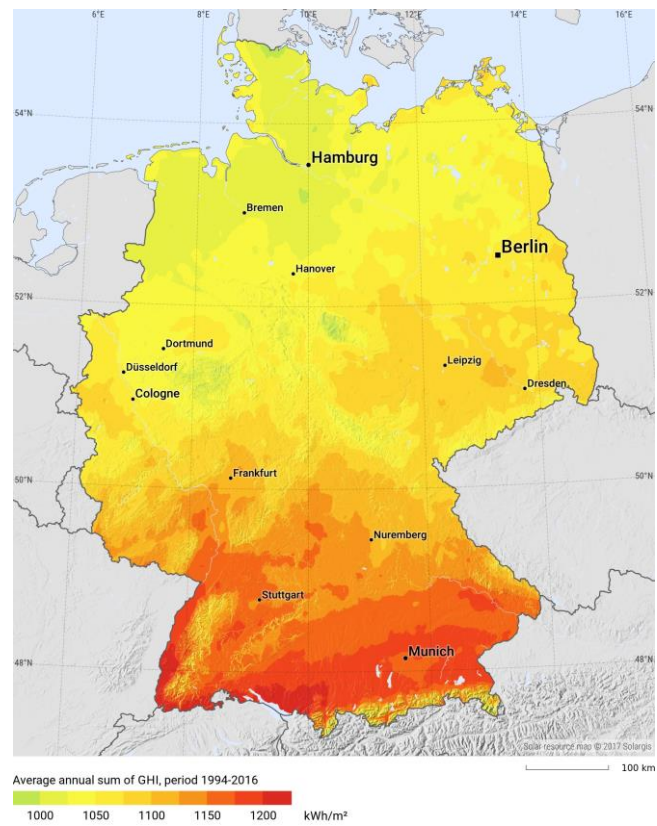


Figura 10 – Mapa da Radiação Solar Global na Alemanha [21]

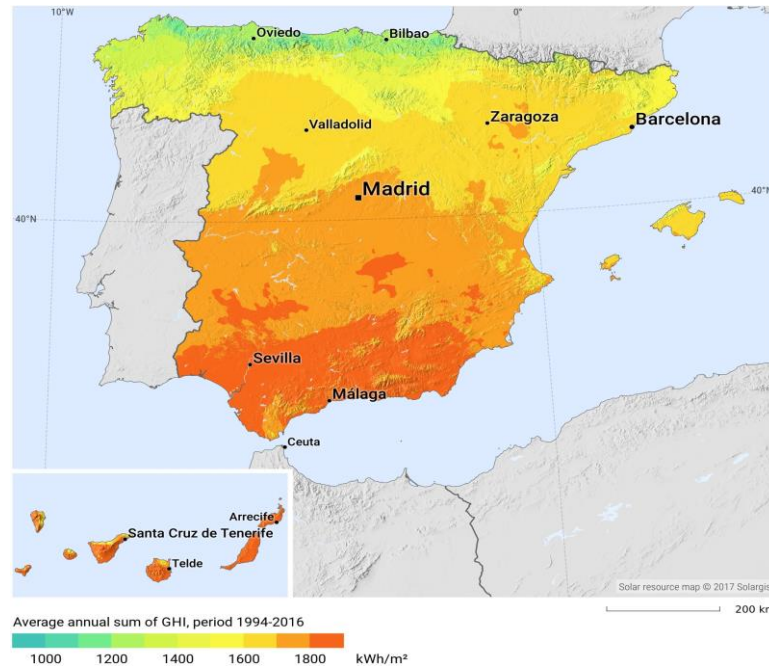


Figura 11 – Mapa da Radiação Solar Global na Espanha [21]

3.2 CADEIA PRODUTIVA DA ENERGIA SOLAR

3.2.1 O Silício

O silício metálico é o principal material que constitui as células solares que compõem os painéis que captam a energia do sol. O silício é o elemento que permite a captação e conversão da energia solar em energia elétrica. É obtido a partir da sílica que está presente no quartzo leitoso [16].

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de silício de grau metalúrgico e mesmo sendo um processo com elevado nível tecnológico, o silício de grau metalúrgico possui baixo valor agregado relativamente ao silício de grau solar. A agregação de valor na etapa é da ordem de 100 vezes: enquanto o quartzo metalúrgico é comercializado a 0,03 US\$/kg, o silício de grau metalúrgico é cotado a 3 US\$/kg. O silício de grau solar é vendido mundialmente pela média de 30 US\$/kg, uma agregação de valor da ordem de 1,000 vezes em relação ao quartzo e 10 vezes em relação ao silício de grau metalúrgico [13].

Para a construção de módulos solares, silício de maior pureza, o silício cristalino em grau solar, é obtido por rota química e térmica. No Brasil, não há a purificação de silício até o grau solar em nível comercial, mas algumas empresas,

em nível laboratorial, estão desenvolvendo o processo de purificação por rota térmica, que tem menor consumo de insumo energético e com bom resultado no custo final. A rota química requer investimentos elevados e abre uma possibilidade de mercado mais ampla, pois o silício de grau eletrônico é utilizado como componente na indústria microeletrônica, aumentando a demanda potencial pelo produto final da indústria de purificação de silício [13].

A figura 12, mostra como é o processo da extração do silício até virar um painel fotovoltaico.

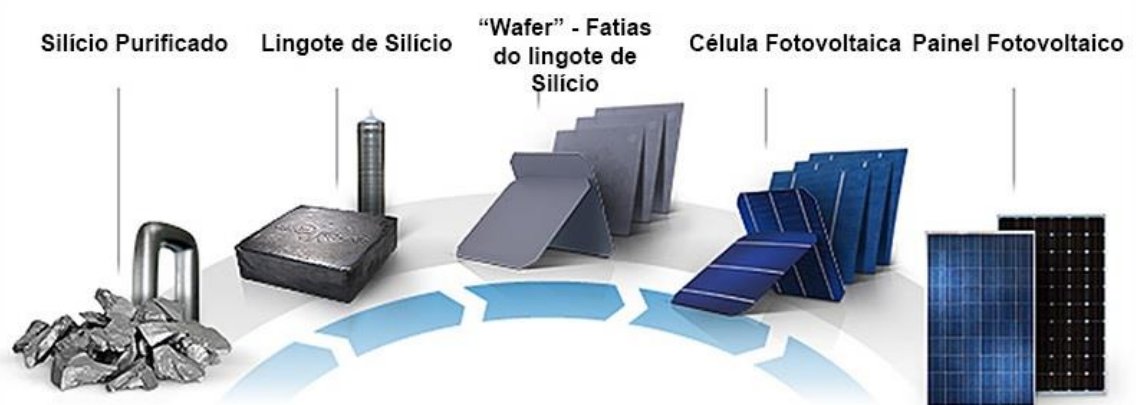


Figura 12 – Processo da extração do Silício a Painel Fotovoltaico [22]

Os módulos fotovoltaicos são formados por células que são produzidas a partir dos *wafers* (laminas) de silício cristalino. Os *wafers* são tratados quimicamente e transformados nas células fotovoltaicas. O silício, neste processo, conduz os elétrons que são desprendidos com a luz do sol e se acumulam em uma corrente elétrica [17]. A figura 13 demonstra como é a cadeia produtiva da energia solar.

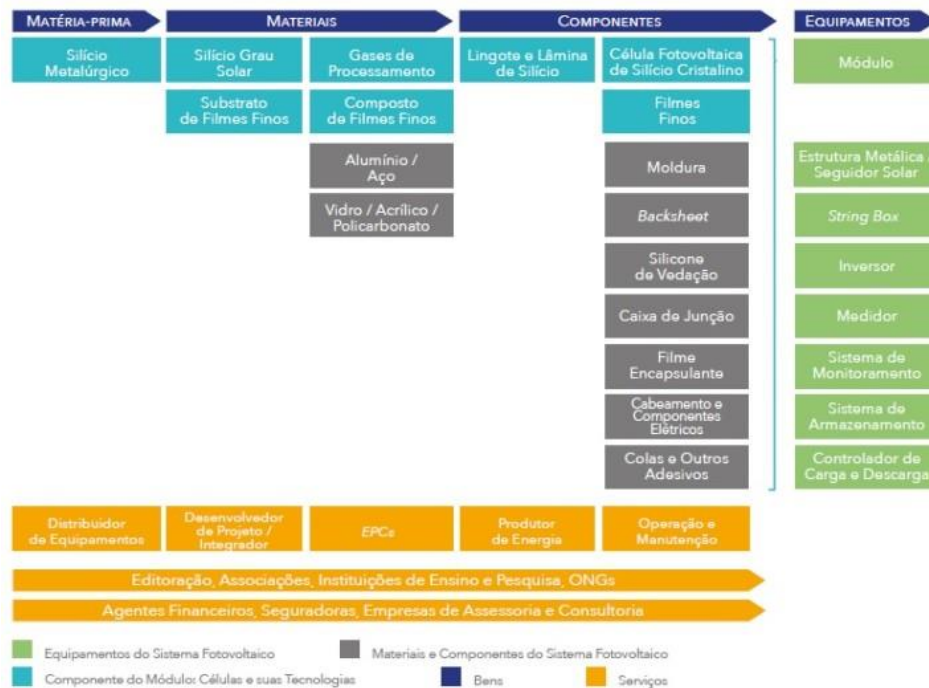


Figura 13 – Cadeia Produtiva da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil [14]

Conforme como pode ser visto na figura 14, o Brasil possui empresas envolvidas na produção de silício metalúrgico e na montagem do módulo fotovoltaico, além das indústrias de suporte.

Estima-se que para cada 1 MW produzido, serão abertos 47 postos de emprego. A cadeia produtiva da energia solar, no Brasil, tem um campo vasto de oportunidades, mas precisa de incentivos, pois para que aja desenvolvimento do setor fotovoltaico no país, é de suma importância a ampliação de políticas públicas na cadeia produtiva. Os fabricantes nacionais não têm como competir, em termos de preço, com o produto importado devido à alta carga tributária que incide sobre os insumos da cadeia produtiva [12].

A produção de energia solar fotovoltaica alavancou a indústria de matéria-prima, somente com os três leilões realizados pelo MME (Ministério de Minas e Energia), R\$13 bilhões foram injetados na cadeia produtiva do setor. Atualmente, no Brasil, há oito fabricantes de módulos fotovoltaicos, a indústria de insumos como aço e alumínio tem um novo nicho de mercado. Segundo a Abal (Associação Brasileira do Alumínio), o fornecimento local dos componentes trará vantagens para a indústria fornecedora como para as fabricas produtoras e agregado valor ao produto crescerá a competitividade brasileira e se tratando de energia solar, considera o alumínio brasileiro competitivo e em igualdade de condições com os produtos

importados e ainda sugere um mercado regulado em que todos paguem impostos igualmente [15].

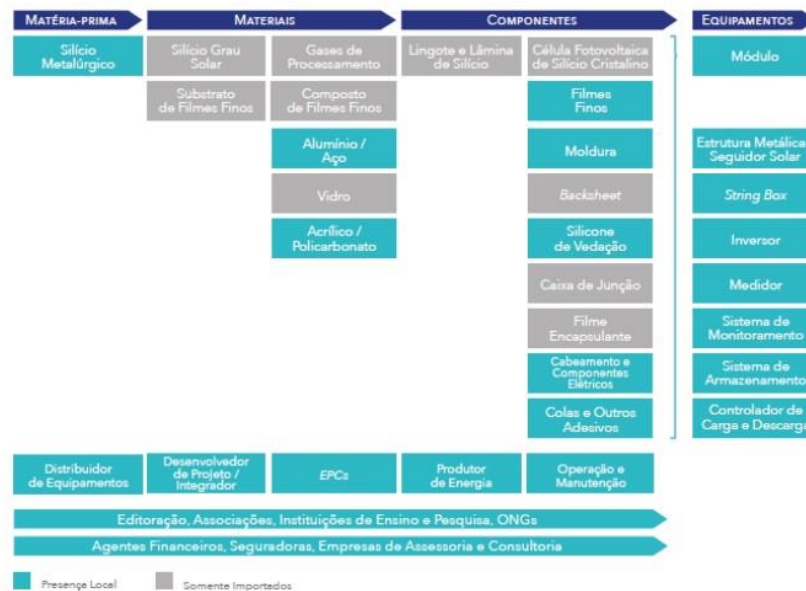


Figura 14 – Fabricantes Nacionais e Internacionais da Cadeia Produtiva Solar Brasileira [14].

3.2.2 Célula Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico é a conversão direta da luz em eletricidade, ocorre quando a luz incide em uma célula de materiais semicondutores (silício) com propriedades específicas [1].

As células fotovoltaicas são compostas por uma junção de dois tipos materiais semicondutores (P e N) que ao receber a luz do sol, os elétrons são energizados e vão acumulando em um dos materiais (o material N tem elétrons excedentes que fluirão para camada P), quando a célula é ligada em circuito fechado, é formado a corrente elétrica, conforme a figura 15 [31].

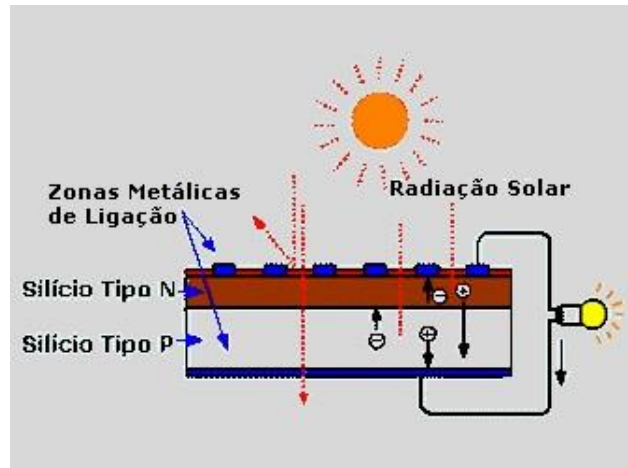


Figura 15 – Efeito Fotovoltaico [31]

Existem vários tipos de células, as principais e mais encontradas no mercado são:

- **Silício Monocristalino:** silício aquecido a altas temperaturas e depois submetido a um processo chamado de método de Czochralski, de formação de cristal, resultando em um lingote de silício monocristalino que são fatiados para produção de *wafers*. Os *wafers* passam por um processo químico, onde são formadas as camadas de silício P e N. A célula recebe uma película metálica em uma das faces e na outra recebe um material antirreflexivo, na face que receberá a luz solar. As células monocristalinas são as mais eficientes (15% a 18%)[1].
- **Silício Policristalino:** o processo do silício policristalino é mais barato comparado ao monocristalino. O lingote policristalino produz *wafers* que se transformarão em células fotovoltaicas. As células policristalinas possuem eficiência entre 13% a 15%, mas seu custo de fabricação é menor do que as células monocristalinas [1].
- **Silício Amorfo:** são células fabricadas no processo de deposição de finas camadas de silício ou outros materiais sobre uma base que pode ser rígida ou flexível. A eficiência dos painéis de silício amorfo é baixa quando se compara com as cristalinas, entre 5% e 8% [1].

3.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

3.3.1 Legislação

Em 17 de abril de 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, onde o consumidor pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, fornecendo o excedente para a rede de distribuição.

A Resolução cria o sistema de compensação de energia, onde se injeta a energia gerada na rede, sendo que essa energia será abatida do consumo próprio ou do mesmo titular. Estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuída ao sistema de distribuição de energia elétrica e de outras providencias [25].

A Resolução Normativa nº 482, de 2012, foi alterada pela Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, que estabelece as seguintes definições [26]:

- microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
- minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor igual a 5 MW para cogeração qualificada ou demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
- Sistema de compensação de energia: a energia injetada por micro e minigeração distribuída é cedida a distribuidora local e depois compensada com consumo de energia elétrica ativa.

Toda energia injetada na rede gerará um crédito e quantidade de energia ativa que deve ser utilizado no prazo de até sessenta meses. A Resolução Normativa nº687/2015 dá a alternativa de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, onde a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos

em porcentagem definida pelos próprios condôminos. Promove a geração compartilhada, que possibilita a união de interessados em consórcios, instalando micro ou minigeração distribuída e dessa forma, utilizem a energia gerada para reduzir as faturas dos consorciados [27].

O Ministério de Minas e Energia (MME), criou o programa de Geração Distribuída (ProGD), por meio da Portaria MME nº538, de 15 de dezembro de 2015, com o objetivo de promover e incentivar a geração distribuída a partir de fontes renováveis e cogeração em edifícios públicos, privados sendo ele residencial, comercial ou industrial [28].

3.3.2 Sistema de Compensação

No Brasil, o sistema de compensação de energia, *net metering*, estabelecido na Resolução Normativa nº 482/2012, permiti que produtores residenciais troquem o excedente de energia gerada por créditos.

A tarifação *net metering* ou medida de energia líquida, é um sistema de medição que empregam sistemas fotovoltaicos residenciais conectado à rede elétrica. Nesse sistema de tarifação, no final do mês o consumidor só pagará a diferença entre o que consumiu e o que gerou, pois existe um medidor eletrônico que registra a energia consumida da rede pública, pela residência, e a energia que a residência produz é ejetada na rede pública [1]. De acordo com a Resolução Normativa nº 687/2015, o proprietário do sistema tem 60 meses para utilizar os créditos gerados, passado esse tempo, os créditos serão perdidos. A figura 16 mostra como funciona um sistema de tarifação *net metering*.

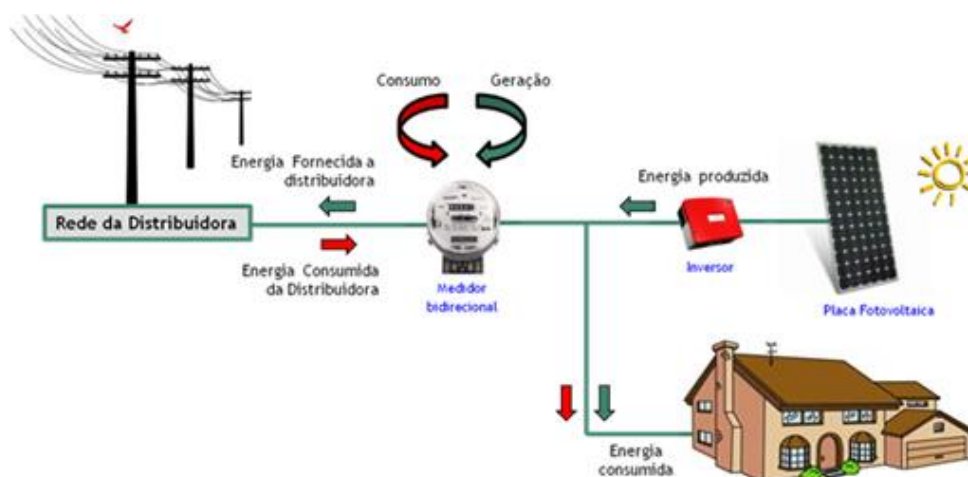


Figura 16 – Sistema de Tarifação *net metering* [29]

Na Alemanha, o sistema de tarifação é o *Feed-In-tariff* (FIT), criado para incentivar o uso de fontes renováveis, utiliza dois medidores como no *net metering*. No *Feed in*, o consumidor é premiado com a instalação de um sistema fotovoltaico em sua residência, recebe pagamento pela energia que foi produzida em casa e injetada na rede elétrica local. O pagamento da energia injetada é maior que o preço da energia consumida da rede pública, tornando mais rentável e vantajoso, em alguns países que aperfeiçoaram o sistema FIT, o consumidor é premiado por toda a energia gerada por fontes renováveis e não pela que é injetada. Com esse incentivo a energia é mais barata ao consumidor [27].

3.3.3 Resultado da Geração Distribuída

Quando entrou em vigor a Resolução Normativa nº 482/2012, houve um lento processo para disseminar a micro e minigeração distribuída no Brasil, conforme a figura 17. Percebe-se na figura, que a partir de 2016 houve um crescimento acelerado na geração distribuída. Os números de conexões acumulado e consumidores com créditos de micro e minigeração distribuída até 23/05/2017.

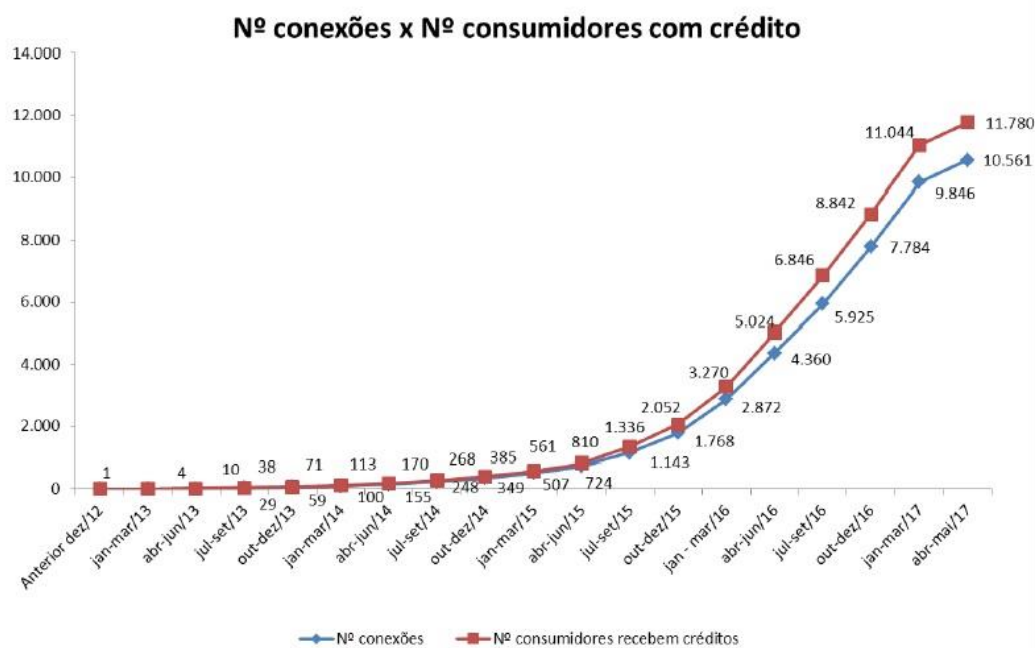


Figura 17 – Numero de micro e minigeração distribuída [30]

Para compreender os números apresentados na figura acima, deve ser considerado a publicação da Resolução Normativa nº 687/2015 que revisou a REN nº 482/2012 aprimorando a regulamentação, reduzindo os custos e o tempo para conexão da micro e minigeração, melhorando as informações contida na fatura, compatibilizar o Sistema de Compensação de energia elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento e aumentar o público alvo. Com essas mudanças, fica claro o crescimento já em 2016 no número de conexões de micro e minigeração.

A figura 18 mostra a liderança da fonte solar fotovoltaica entre os geradores instalados por fonte de energia. Segundo os dados da ANEEL, são 29.056 conexões solares fotovoltaicas, correspondendo a 99% do número total de instalações e com um montante de 265.854,88 MW que responde a 77% da potência instalada de uma potência instalada total de 344 MW [42].

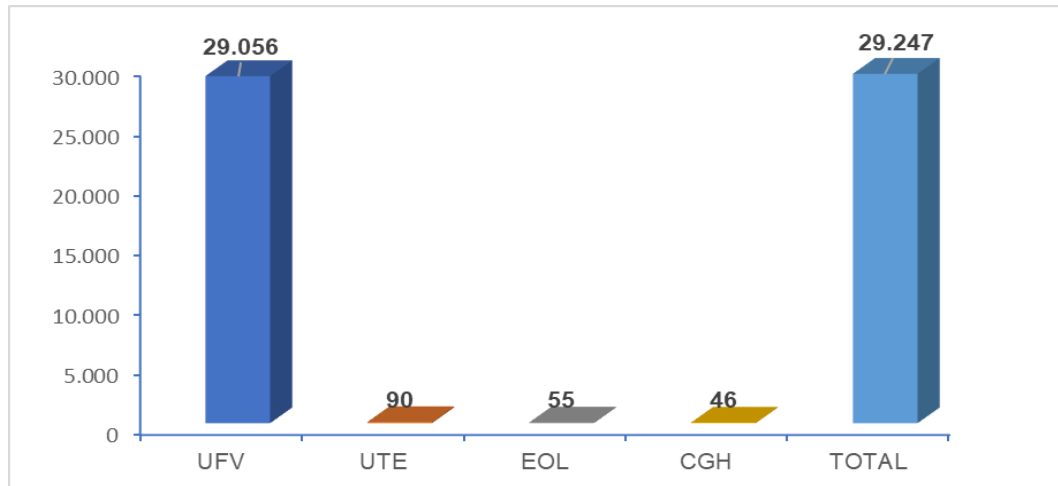


Figura 18 – Conexões por tipo de fonte [30]

Com todos os dados apresentados, ainda é baixo a participação da geração distribuída de fontes solar fotovoltaica diante dos bons números de radiação global e direta que incidem no território brasileiro. A falta de incentivos governamentais, como realizados na Alemanha, ainda estão distantes de acontecer no Brasil e atrasam o crescimento da utilização de fontes renováveis, principalmente a fonte solar fotovoltaica.

Entre as classes de consumo, a figura 19, mostra como as residências tem papel importante na geração distribuída.

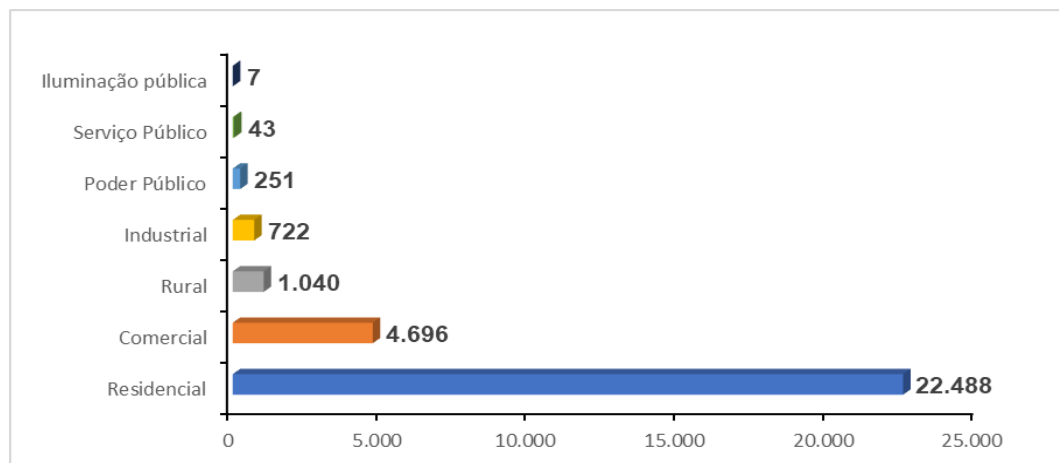


Figura 19 – Classe de consumo de consumidores [30]

Cerca de 76% das instalações em GD são de residências. Em seguida aparece o comércio (16%), consumidores rurais (3,5%), as industriais (2,4%), o poder público (0,8%) e serviços públicos (0,1%) [43].

Estudos feitos pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) identificou o potencial de geração fotovoltaica nos telhados residenciais, visto na Tabela 1. Nesse estudo, foram levados em consideração: os dados de irradiação solar em todo os estados do Brasil, a área de telhado disponível para a instalação de sistemas fotovoltaicos e a eficiência do recurso solar em eletricidade.

Tabela 1 – Potencial de Geração Fotovoltaica em Telhados [4]

UF	Potencial Fotovoltaico Residencial (MW médios)	Potencial Fotovoltaico Residencial (GWh/ano)	Consumo Residencial Anual 2013 (GWh)	Potencial Fotovoltaico/Consumo Residencial
AC	110	964	373	258%
AL	505	4.424	1.227	361%
AM	420	3.679	1.784	206%
AP	80	701	500	140%
BA	2.360	20.674	6.144	337%
CE	1.430	12.527	3.751	334%
DF	410	3.592	2.191	164%
ES	595	5.212	2.213	236%
GO	1.220	10.687	3.958	270%
MA	1.020	8.935	2.563	349%
MG	3.675	32.193	10.118	318%
MS	505	4.424	1.571	282%
MT	570	4.993	2.182	229%
PB	1.020	8.935	2.632	339%
PB	655	5.738	1.603	358%
PE	1.410	12.352	4.563	271%
PI	555	4.862	1.328	366%
PR	1.960	17.170	6.986	246%
RJ	2.685	23.521	12.833	183%
RN	555	4.862	1.805	269%
RO	265	2.321	1.084	214%
RR	65	569	345	165%
RS	1.970	17.257	7.750	223%
SC	1.075	9.417	4.935	191%
SE	350	3.066	979	313%
SP	7.100	62.196	38.783	160%
TO	255	2.234	695	321%
Total	32.820	287.505	124.896	230%

Quanto mais povoado a região, maior será seu potencial para geração de energia fotovoltaica em telhados, mas percebe-se que em qualquer estado brasileiro a geração é maior que o consumo. O potencial fotovoltaico/consumo residencial total

de 230% significa que o potencial é de cerca de 2,3 vezes maior que o consumo e mesmo sendo uma hipótese pouco factível, comprovou que a área não será um fator limitante para o desenvolvimento do sistema fotovoltaico para geração no cenário brasileiro [44].

No Brasil, são cerca de 80 milhões de residências que podem aproveitar sua área de telhado para gerar energia. O crescimento da micro e minigeração distribuída fotovoltaica pode ser determinada pela redução no preço da energia solar ao longo dos anos e o aumento sucessivo da tarifa de energia elétrica, com esses fatores, o conhecimento da população por essa tecnologia só tende a aumentar no decorrer dos anos trazendo economia ao consumidor e responsabilidade socioambiental por se tratar de uma energia limpa.

3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O sistema fotovoltaico pode ser: Isolado (composto de painel fotovoltaico, controlador de carga e bateria) e Conectado à rede elétrica da distribuidora (CEB). A figura 20, mostra como funciona o sistema fotovoltaico conectado à rede.

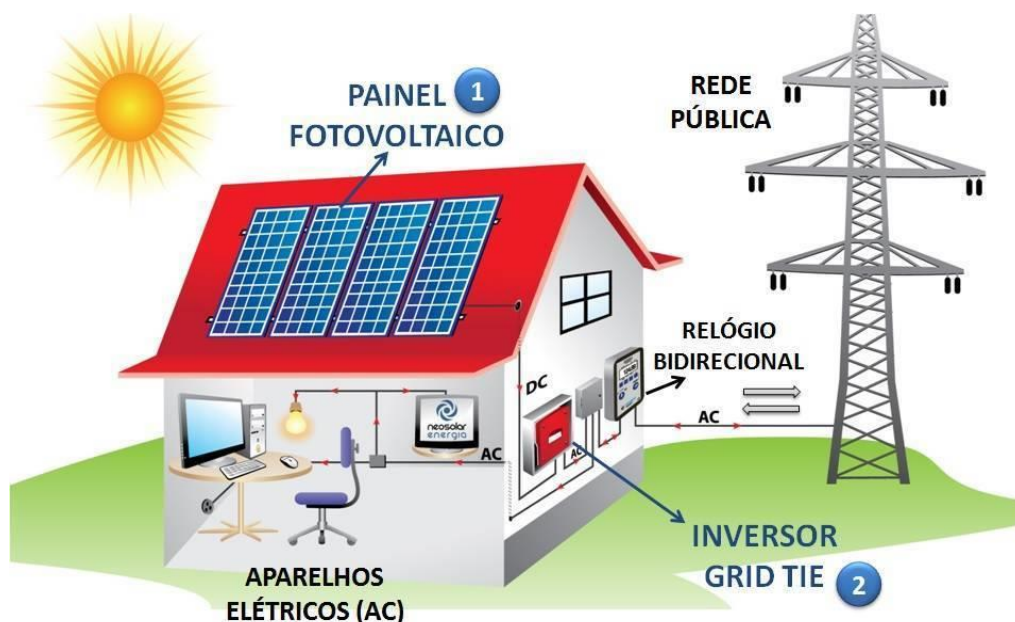


Figura 20 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica [38]
Os principais componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede são:

- Painel Fotovoltaico;
- Inversor;

- Caixa de *Strings*;
- Conectores;
- Medidor Bidirecional;

3.4.1 Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico é formado por várias células que são montadas em uma estrutura rígida e conectadas, em série, onde produzirão maiores tensões como mostra a figura 21 [1].

A tensão nominal do painel será igual ao produto da tensão de cada célula (0,4 a 0,7 volts) pelo número de células. Comercialmente há painéis com 32, 60 e 72 células em série. Dentro do painel fotovoltaico, as células que estão ligadas em serie são encapsuladas em um plástico elástico (Etilvinilacelato-EVA) que serve também como isolante elétrico; um vidro temperado com a face voltada para o sol e uma lâmina plástica multi-camada (Poliester) na face posterior. A moldura do painel é de alumínio e caixas de ligações que chegam aos terminais positivos e negativos da série de células [34].



Figura 21 – Painel Fotovoltaico Policristalino Canadian Solar CS6K-270P [32]

Os painéis fotovoltaicos podem ser classificados como [33]:

Em função do material celular:

- Módulos monocristalinos
- Módulos policristalinos
- Módulos de películas fina (amorfos, CdTe...)

Em função do material de encapsulamento:

- Módulos Teflon
- Módulos de Resina Fundida (EVA)

Em função da tecnologia de encapsulamento:

- Laminagem (EVA ou Teflon)

Em função da tecnologia do substracto:

- Módulos película-película (flexíveis)
- Módulos metl-película
- Módulos de plástico acrílico
- Módulos vidro-vidro

Em função da estrutura da armação:

- Módulos com armação
- Módulos sem armação (módulos laminados)

Em função de funções específicas de construção:

- Módulos de vidro de segurança endurecido
- Módulos de vidro de segurança laminado
- Módulos de vidro isolante
- Módulos de vidro isolante para coberturas de vidro
- Módulos de vidro laminado

A corrente elétrica fornecida pelo painel fotovoltaico dependerá da radiação solar que incide nas células. A corrente máxima que o painel pode fornecer vai variar com a irradiação solar, ou seja, se haver pouca luz solar nas células, a corrente que

o painel irá fornecer será pequena e conseqüentemente a sua capacidade de gerar energia será reduzida [1].

Os painéis podem ser ligados em:

- **Série:** nesse tipo de ligação, a tensão (V) de cada painel é somada e a corrente (I) que passa por todo conjunto é a mesma em cada painel. A ligação em série é utilizada quando se quer elevar a tensão final do sistema fotovoltaico.
- **Paralelo:** a ligação em paralelo, a corrente (I) dos painéis são somadas e a tensão é a mesma em cada painel.

3.4.2 Inversor

O inversor para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, como mostra a figura 22, converte a corrente contínua (CC), dos painéis fotovoltaicos, em corrente alternada (CA), funcionando somente quando conectado a uma rede elétrica e se interligar com a rede da distribuidora de energia, sincronizando a frequência e a tensão de saída com a rede elétrica [35].

As principais características encontradas nos inversores são:

- **Range ou Faixa de Útil de Tensão Contínua na Entrada:** é o intervalo dos valores de tensão de entrada em que o inversor pode operar. O sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), maximiza a produção de energia dos painéis nessa faixa de tensão. Valores acima ou abaixo do limite da faixa podem acarretar perda de eficiência no sistema fotovoltaico.
- **Tensão Contínua Máxima na Entrada:** é o valor máximo absoluto da tensão admissível na entrada do inversor.
- **Número Máximo de *Strings* na Entrada:** os painéis fotovoltaicos ligados em série formam *strings*. Em alguns projetos, para aumentar a potencia do sistema FV, pode-se acrescentar strings em paralelo. Os inversores comerciais possuem, geralmente, quatro entradas de *strings*.
- **Número de Entradas Independentes com MPPT:** os inversores conectados à rede possuem MPPT, ou seja, são preparados pra maximizar a potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos tornando mais eficiente o sistema fotovoltaico.

- Distorção da Corrente Injetada na Rede: a distorção harmônica total (DTH ou THD, Total *Harmonic Distortion*) da corrente que é injetada na rede elétrica pelo inversor não pode ser maior que 5%.
- Temperatura de Operação: os inversores são desenvolvidos para trabalharem dentro de uma determinada faixa de temperatura. Temperaturas sendo muito altas ou baixas podem danificar e impedir o funcionamento do inversor.
- Umidade Relativa do Ambiente: ambientes com umidade relativa do ar elevadas, deve-se levar em conta a instalação dos inversores, pois locais muito úmidos podem levar a falhas do inversor.
- Potência de Corrente Contínua na Entrada: são valores em watts (W) ou watts de pico (Wp) que mostram a potência de pico do conjunto fotovoltaico que pode ser ligado ao inversor.
- Potência de Corrente Alternada na Saída: é a potência máxima que o inversor injeta na rede elétrica, essa potência está relacionada a tensão de operação do inversor e a corrente máxima suportada na conexão com a rede elétrica.
- Rendimento: quanto maior o rendimento, melhor será o aproveitamento de energia dos painéis fotovoltaicos.



Figura 22 – Inversor Fronius On-Grid 6 kW [36]

3.4.2.1 Microinversor

Os microinversores são inversores menores que são ligados a cada painel fotovoltaico, tornando cada painel independente, caso um painel sofra com sombreamento, isso não irá afetar o restante do sistema. A produção de energia pode ser independente e cada painel tem seu próprio MPPT. A figura 23, mostra como fica a utilização de microinversores no sistema fotovoltaico.



Figura 23 - Painéis Solares conectado a um microinversor [37]

3.4.3 Caixa de *Strings* ou *String Box*

A Norma Brasileira 5410 estabelece as condições para as instalações elétricas de baixa tensão, garantindo a segurança das pessoas e o adequado funcionamento da instalação e a conservação dos bens [39]. Nos sistemas fotovoltaicos, a caixa de *string* é um equipamento de proteção que isola o sistema fotovoltaico impedindo acidentes elétricos. É conectada ao inversor e ao quadro geral de energia elétrica, caso a distância dos painéis solares e o inversor for maior que 10 metros, deve ser instalada uma *string box* perto dos painéis. O *string box* protege os painéis fotovoltaicos (lado CC) das descargas elétricas gerada ou recebidas pelo campo magnético dos fios, no lado de corrente alternada protege contra descargas atmosféricas.

Os elementos que compõe uma caixa de *string*, mostrada na figura 24, são:

- Fusível: usados para proteger os painéis e cabos dos *strings* contra sobrecarga e correntes reversas de acordo com a Norma IEC 60364.
- Chave seccionadora CC: necessária quando houver manutenção dos painéis, garantindo a segurança nos inversores. Devem suportar níveis de tensão no sistema fotovoltaico

- Dispositivo de Proteção de Surto (DPS): protege todo sistema de sobretensões devido às descargas atmosféricas. A Norma IEC 60364 recomenda o uso de DPS II nos sistemas fotovoltaicos e a Norma NBR 5410:2004, 6-3-5, que trata da instalação e seleção de DPS para proteção contra sobretensão transitória.

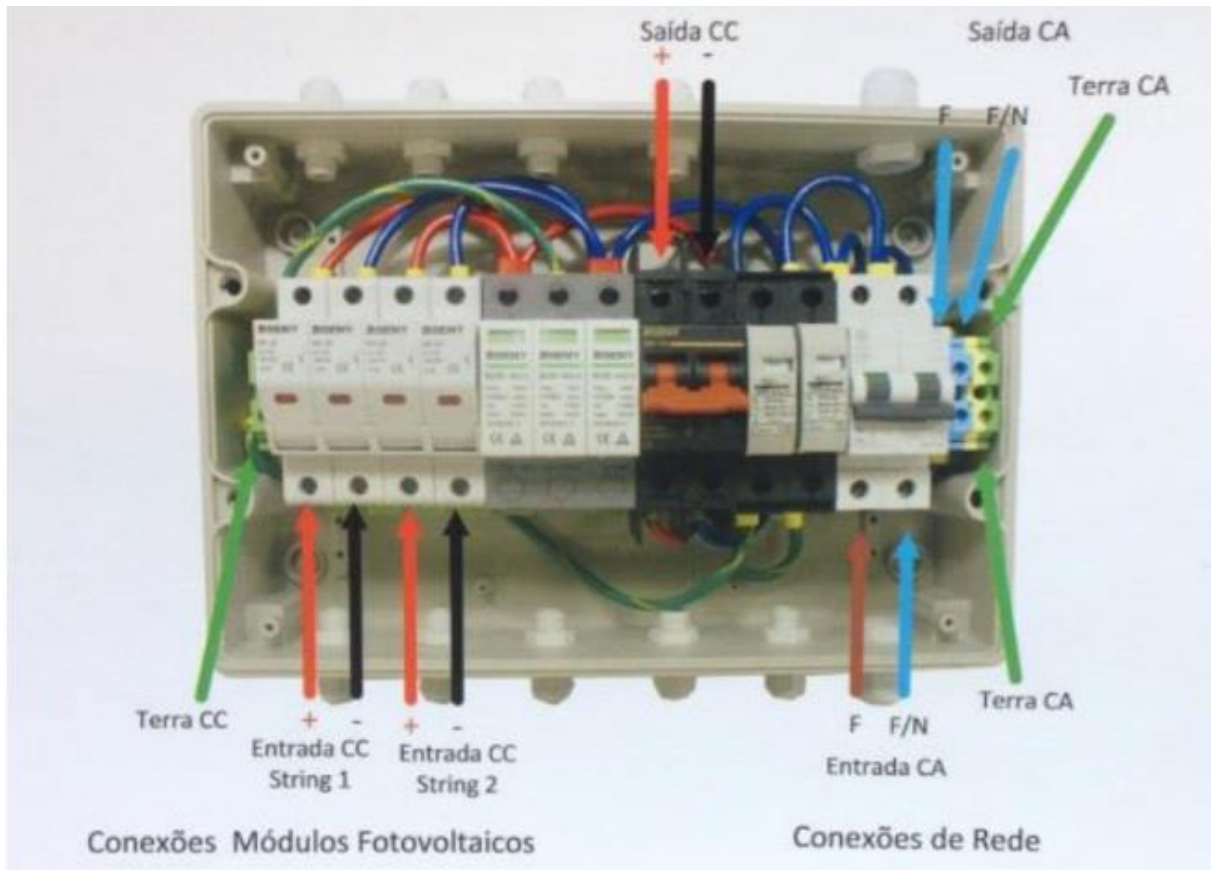


Figura 24 – String Box CC-CA [40]

3.4.4 Conectores

Os conectores MC4, como mostra a figura 25, são os mais utilizados para sistemas fotovoltaicos encontrados no mercado, apresentam maior segurança por meio do seu sistema de travamento e são empregados nos cabos fornecidos com os painéis fotovoltaicos. Possui facilidade de instalação nos painéis quando montados em série e paralelo somente conectando um cabo ao outro. Outro tipo de conector, o MC4 *multi-branch*, que possui duas entradas e uma saída que são utilizadas em ligação paralela.



Figura 25 – Conectores MC4 Macho e Fêmea [41]

3.4.5 Perdas no Sistema Fotovoltaico

As perdas do sistema fotovoltaico podem ser causadas por vários fatores: temperatura nos painéis, sombreamento, perdas nos condutores, sujeiras entre outros. Perdas por decaimento da potência dos painéis (eficiência das células), em média, são de 0,8% anualmente. A tabela 1 mostra as principais perdas do sistema fotovoltaico.

Tabela 1 – Perdas consideradas no sistema fotovoltaico. Fonte: Adaptado de [56]

Perda	Valor Considerado	Variações da perda
Desvio no rendimento nominal do módulo e da radiação de 1000 W/m ²	2,50%	-5% a 10%
Temperatura no módulo	3,50%	-3% a 6%
Perdas nos condutores do lado CC	2%	1% a 3%
Perdas nos condutores do lado CA	1%	0,7% a 2%
Eficiência do Inversor na conversão	1,50%	1% a 15%
Mismatch no MPPT	2%	1,5% a 3%
Sombreamento	0,00%	0% a 100%
Diodos e Conexões	0,5%	0,3% a 1%
Transformadores (como os de isolamento no inversor, por exemplo)	2%	2% a 4%
Sistema (Solar-Tracking)	0%	0% a 2%
Degradação na incidência solar inicial	1%	1% a 10%
Indisponibilidade do sistema	0%	0% a 0,5%
Sujeira nos módulos	2%	2% a 25%
Total de perdas	18%	

3.4.6 Medidor Bidirecional

O medidor bidirecional contabiliza o total de energia que foi consumida pela residência e a que foi injetada pelo sistema fotovoltaico na rede da distribuidora. O desconto na conta de luz é calculado subtraindo a energia consumida pela residência da energia injetada. Se a energia injetada for maior que o consumo, é gerado crédito que valem por 60 meses. De acordo com a Resolução nº 482 da ANEEL, o projeto de geração distribuída é enviado para a distribuidora local de energia (CEB) para aprovação, sendo aprovado, a distribuidora faz a troca dos medidores e fica responsável pela manutenção e operação.

3.4.7 Normas para o Sistema Fotovoltaico

Uma norma é um documento aprovado por um organismo reconhecido fornecendo regras para atividades sempre visando um grau ótimo de ordenação para um dado contexto. As Normas técnicas fornecem especificações mundiais garantindo qualidade, eficiência e segurança. Para sistemas fotovoltaicos, as principais Normas nacionais e internacionais são:

- NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão.

Estabelece as condições a que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens.

- NBR 5419:2015 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.

Fixa as condições de projeto, instalação e manutenção de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

- NBR 15389:2006 - Bateria chumbo-ácida estacionária regulada por válvula - Instalação e montagem.

Fixa os requisitos para projeto de instalação e procedimentos para armazenagem, montagem, ativação e aceitação de baterias chumbo-ácidas reguladas por válvula para aplicações estacionárias, bem como requisitos de segurança e de instrumentação.

- NBR 16149:2013 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.

Estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica e estabelece seus requisitos.

- NBR 16150:2013 - Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade.

Especifica os procedimentos de ensaio para verificar se os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia estão em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16149.

- NBR 16274:2014 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.

Estabelece as informações e a documentação mínimas que devem ser compiladas após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Também descreve a documentação, os ensaios de comissionamento e os critérios de inspeção necessários para avaliar a segurança da instalação e a correta operação do sistema.

- NBR IEC 62116:2012 – Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Fornece um procedimento de ensaio para avaliar o desempenho das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

- NBR 14039:2005 – Instalações Elétricas de média tensão de 1 kv a 36,5 kv.

Estabelece um sistema para o projeto e execução de instalações elétricas de média tensão, com tensão nominal de 1,0 kV a 36,2 kV, à frequência industrial, de modo a garantir segurança e continuidade de serviço.

- PRODIST - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição.

Descrever os procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída participante do Sistema de Compensação de Energia Elétrica ao sistema de distribuição

- NR-10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade.

Estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.

- NR-35 - Trabalho em altura.

Estabelece os requisitos mínimos e as medidas de proteção para o trabalho em altura, envolvendo o planejamento, a organização e a execução, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores envolvidos direta ou indiretamente com esta atividade

- Portaria 004/2011 (Inmetro) - Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica (módulos, controlador de carga, inversor de bateria).

Estabelece os critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica, por meio do mecanismo da Etiquetação, para utilização da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, atendendo aos requisitos do Programa Brasileiro de Etiquetação - PBE, visando à eficiência energética e adequado nível de segurança.

- NTD – 6.09 - Requisitos para a Conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição CEB-D – Conexão em Baixa e Média Tensão

Concentrar e sistematizar os requisitos de informações técnicas pertinentes às novas conexões ou alteração de conexões existentes de consumidores que

façam a adesão ao sistema de compensação de energia, ao sistema de distribuição em baixa tensão da CEB-D, de forma a facilitar o fluxo de informações e simplificar o atendimento a estes consumidores.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 LOCAL DE ESTUDO

O local de estudo encontra-se na Asa Norte, na quadra 710 abrangendo os Blocos D, G e K, conforme a figura 26. Os prédios são funcionais, todos com 2 andares, sendo que os Blocos D e K são compostos de 16 apartamentos e o Bloco G contendo 20 apartamentos e não possuem elevadores. Para o estudo de caso, será analisado apenas os dados de consumo do prédio (iluminação e instalações de uso comum de prédio), não será levado em consideração o consumo dos moradores. As áreas dos três prédios são determinadas na tabela 2.

Tabela 2 – Área dos Blocos D, G e K

Bloco	Área do Terreno (m²)	Área de Telhado (m²)
D	853,5	730
G	955	816
K	853,5	730

Para o cálculo da área de telhado foi utilizado o programa DroneDeploy, um software de mapeamento aéreo feito com drones, fornece metragem quadrada precisa, características do telhado, área de superfície e inclinação. Suas imagens são Georreferenciadas com precisão de 2,3 cm/px.



Figura 26 – Vista aérea dos Blocos D, G e K [45]

4.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Inicialmente foi realizada uma análise do consumo de energia elétrica dos três prédios para dar início ao dimensionamento do sistema fotovoltaico nos locais de estudo. Foi levado em consideração o consumo médio mensal, em kWh/mês, que vem detalhado na conta de luz. Os dados de consumo dos prédios podem ser verificados na tabela 3.

Tabela 3 – Consumo médio dos Blocos D, G e K

Bloco	Consumo Médio Mensal (kWh/mês)
Situação 1 – Consumo Individual	
D	272
G	445
K	227
Situação 2 – Consumo Conjunto	
D+G+K	944

De acordo com a Resolução Normativa nº 414/2010, da ANEEL, os prédios são do Grupo B, destinado a unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 KV, da classe B3 (Poder Público).

4.3 POTENCIAL SOLAR DE BRASÍLIA

Um dado importante para um projeto de sistema fotovoltaico são os índices de incidência de radiação solar no local de estudo ou local onde será implantado o sistema FV. Foi utilizado o programa SunData que utiliza o banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar produzido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST). O SunData calcula a irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território brasileiro, por meio das coordenadas geográficas. O programa faz a busca pela localidade desejada, mostrando dados de irradiação solar (kWh/m².dia), no plano horizontal e inclinado para no mínimo três localidades próximas do ponto de interesse. Vale ressaltar que no plano inclinado há três diferentes ângulos de inclinação em relação ao plano horizontal: o ângulo igual a latitude; ângulo que dá o maior valor médio e mínimo diário anual de irradiação solar [46].

Os dados da figura 27, são da localização onde se realiza o estudo de caso e mostram a irradiância em função da inclinação do sistema. De acordo com os valores encontrados ao inserir os dados de longitude (47°849' Oeste) e latitude (15°801' Sul), é mostrado o índice solarimétrico das três localidades próximas do local informado.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Brasília
Município: Brasília, DF - BRASIL
Latitude: 15,801° S
Longitude: 47,849° O
Distância do ponto de ref. (15,760278° S; 47,894167° O) :6,6 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,42	5,74	5,05	5,06	4,83	4,70	4,95	5,77	5,70	5,59	5,08	5,44	5,28	1,08
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	16° N	5,01	5,50	5,10	5,45	5,56	5,60	5,83	6,47	5,91	5,45	4,75	4,98	5,47	1,72
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	4,94	5,45	5,08	5,48	5,63	5,69	5,92	6,53	5,91	5,41	4,69	4,90	5,47	1,84
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	5° N	5,32	5,70	5,10	5,22	5,09	5,01	5,26	6,03	5,80	5,58	5,00	5,32	5,37	1,03

Figura 27 – Irradiação solar diária média mensal para o local de estudo [46]

4.4 DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO

4.4.1 Escolha do painel fotovoltaico

Para a escolha do painel fotovoltaico foi levado em consideração o preço, então foi realizado uma pesquisa com diversas marcas e modelos, conforme a tabela 4.

Tabela 4 – Preços dos Painéis Fotovoltaicas [47]

Marca	Modelo	Eficiência	Potência	Preço	\$/W
Astroenergy	CHSM66-10P	16,5	270	R\$ 649,00	R\$ 2,40
Canadian Solar	CS6U-330P	16,97	330	R\$ 719,00	R\$ 2,18
Canadian Solar	CSK-300MS	18,33	300	R\$ 709,00	R\$ 2,36
Canadian Solar	CS6K-270P	16,5	270	R\$ 569,00	R\$ 2,10
Globo Brasil	GBR-260P	16	260	R\$ 799,00	R\$ 3,07
Risen Solar	RSM366-150P	15,15	150	R\$ 389,00	R\$ 2,59
Talesun Solar	TP672P	16,5	270	R\$ 584,00	R\$ 2,16
Talesun Solar	TP672P	16,7	325	R\$ 729,00	R\$ 2,24

Para a escolha do painel, foi estabelecida uma razão entre o custo do painel por sua potência ($\$/W$), assim foi o escolhido o painel mais barato que ofereça mais potência ao sistema fotovoltaico. De acordo com a tabela 4, o painel que obteve a menor relação $\$/W$ foi o Canadian Solar CS6K-270P, os dados do painel estão na tabela 5.

A tabela 6 mostra as especificações técnicas do painel Canadian Solar CS6K-270P. A curva corrente x tensão demonstrada na figura 28, são dados com características elétricas em STC (*Standard Test Conditions*) refere-se às condições padronizadas de teste do painel, considerando a irradiância solar em 1000 W/m^2 , temperatura a 25°C de célula solar, AM 1,5. O NOCT (*Normal Operation Cell Temperature*) representa a temperatura de operação da célula. A taxa de radiação solar é de 800 W/m^2 , temperatura de célula a 20°C , AM 1,5 e velocidade do vento de 1 m/s .

Tabela 5 – Dados do painel CS6K-270P [48]

Canadian Solar CS6K-270P

Potência Máxima Nominal	270 Wp
Tipo de Célula	Silício Policristalino
Número de Célula	60 (6x10)
Eficiência	16,5%
Dimensão	1650 x 992 x 40 mm
Área	1,6 m ²
Peso	18,2 kg

Tabela 6 – Especificações Elétricas por tipo de funcionamento [48]

Dados Elétricos	STC	NOCT
Potência Nominal	270 Wp	198 Wp
Máxima (Pmax)		
Tensão Ótima de Operação (Vmp)	30,8 V	28,3 V
Corrente Ótima de Operação (Imp)	8,75 A	7 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	37,9 V	35,3 V
Corrente de Circuito Aberto (Isc)	9,32 A	7,53 A

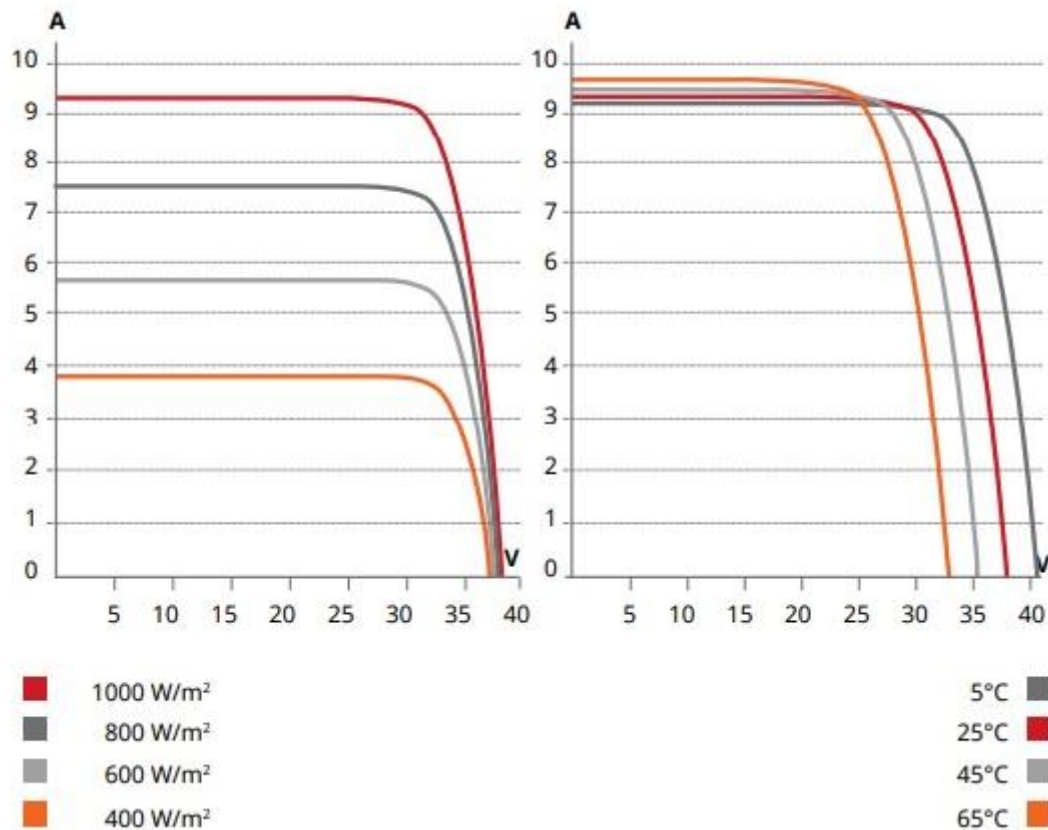


Figura 28 – Curva I x V em função da irradiância e temperatura [48]

4.4.2 Produção de Energia pelo painel Canadian Solar CS6K-270P

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico aplicado aos três prédios deve determinar quanta energia será produzida diariamente com o painel Canadian Solar no local de estudo, o método usado será fundamentado na insolação diária, valor já conhecido (figura 27) [1]. Sabendo a área e a eficiência do painel fotovoltaico escolhido (tabela 5), pode-se calcular a energia diária produzida:

$$E_{pr} = E_s \times A_p \times \eta_p \quad (1)$$

Onde:

E_{pr} = Energia produzida pelo painel diariamente [Wh]

E_s = Insolação diária [Wh/m²/dia]

A_p = Área da superfície do painel [m²]

η_p = Eficiência do painel

$$E_{pr} = 5,47 \text{ [kWh/m}^2\text{.dia]} \times 1,63 \text{ [m}^2\text{]} \times 16,5\%$$

$$E_{pr} = 1,4 \text{ kWh/dia} = 44,3 \text{ kWh/mês} = 539,2 \text{ kWh/ano}$$

A energia produzida diariamente pelo painel Canadian Solar CS6K-270P é de 1,4 kWh, obtido esse valor de energia produzida, pode-se determinar a quantidade de painéis que serão utilizados.

4.4.3 Dimensionando o número de painéis no Sistema Fotovoltaico

A quantidade de painéis que serão utilizados no sistema fotovoltaico é determinada por:

$$N_p = E_{\text{sistema}}/E_{\text{painel}} \quad (2)$$

Onde:

N_p = número de painéis da instalação fotovoltaica

E_{sistema} = Energia produzida pelo sistema [kWh] no intervalo de tempo considerado

E_{painel} = Energia produzida por um painel [kWh] no mesmo intervalo de tempo

De acordo com a tabela 3, que mostra o consumo médio mensal de cada bloco, e com o valor da energia produzida diariamente pelo painel Canadian Solar CS6K-270P, pode-se calcular o número de painéis fotovoltaicos para cada prédio (tabela 7).

Para o Bloco D:

$$N_p = 272 \text{ [kWh/mês]} / 44,3 \text{ [kWh/mês.painel]}$$

$$N_p = 6 \text{ painéis}$$

Para o Bloco G:

$$N_p = 425 \text{ [kWh/mês]} / 44,3 \text{ [kWh/mês.painel]}$$

$$N_p = 9 \text{ painéis}$$

Para o Bloco K:

$$N_p = 227 \text{ [kWh/mês]} / 44,3 \text{ [kWh/mês.painel]}$$

$$N_p = 5 \text{ painéis}$$

Para D+G+K:

$$N_p = 944 \text{ [kWh/mês]} / 44,3 \text{ [kWh/mês.painel]}$$

$$N_p = 20 \text{ painéis}$$

Tabela 7 – Número de painéis para as duas situações

Bloco	$N_p = E_{\text{sistema}}/E_{\text{painel}}$	Número de Painéis
Situação 1 – Quantidade de Painéis Individualizado		
D	$N_p = 272/44,3$	$N_p = 6$
G	$N_p = 425/44,3$	$N_p = 9$
K	$N_p = 227/44,3$	$N_p = 5$
Situação 2 – Quantidade de Painéis Conjunto		
D+G+K	$N_p = 944/44,3$	$N_p = 20$

4.4.4 Potência Instalada do Sistema Fotovoltaico (Wp)

Obtido o número de painéis necessário para cada Bloco (D, G e K) suprir a demanda de consumo de energia elétrica, pode-se determinar a potência instalada (Tabela 8) do sistema através da formula:

$$PI = N_p \times P_p \quad (3)$$

Onde:

PI = Potência Instalada [Wp]

N_p = Número de painéis Fotovoltaicos

P_p = Potencia do painel Fotovoltaico [Wp]

Para o Bloco D:

$$PI = 6 \times 270 \text{ Wp}$$

$$PI = 1,62 \text{ kWp}$$

Para o Bloco G:

$$PI = 9 \times 270 \text{ Wp}$$

$$PI = 2,43 \text{ kWp}$$

Para o Bloco K:

$$PI = 5 \times 270 \text{ Wp}$$

$$PI = 1,35 \text{ kWp}$$

Para D+G+K:

$$PI = 20 \times 270 \text{ Wp}$$

$$PI = 5,4 \text{ kWp}$$

Tabela 8 – Potência Instalada para o Sistema Fotovoltaico

Bloco	$PI = N_p \times P_p$	Potência Instalada (kWp)
Situação 1 – Potência Instalada Individualizado		
D	$PI = 6 \times 270$	1,62
G	$PI = 9 \times 270$	2,43
K	$PI = 5 \times 270$	1,35
Situação 2 – Potência Instalada Conjunto		
D+G+K	$PI = 20 \times 270$	5,4

4.4.5 Geração de Energia Fotovoltaica

Determinado a potência de Pico (P_p) para cada Bloco, pode-se determinar a produção anual estimada de um sistema fotovoltaico. Foi considerado um rendimento médio de 80% sem considerar as perdas na eficiência das células devido a temperatura. A energia produzida anualmente é determinada pela equação 4 e apresentada na tabela 9.

$$E_G = P_p \times R \times I \times 365 \quad (4)$$

Onde:

E_G = Energia Gerada pelo Sistema Fotovoltaico (kWh/ano)

P_p = Potência de Pico (kWp)

R = Rendimento médio (%)

I = Irradiação Solar média Mensal (kwh/m²)

Tabela 9 – Geração de Energia Estimada

Bloco	Potência de Pico (kWp)	Irradiação (kWh/m ²)	Rendimento Médio (80%)	Geração Anual (kWh/ano) $E_G = P_P \times I \times R \times 365$
D	1,62	5,47	0,8	2587,53
G	2,43	5,47	0,8	3881,29
K	1,35	5,47	0,8	2156,27

4.4.6 Área de telhado do Sistema Fotovoltaico

Determinar a área de telhado que será ocupada pelos painéis é de grande importância para este trabalho, pois há grandes obstáculos para instalar um sistema fotovoltaico em telhados de prédios, são caixas d'água, antenas, sombreamento de árvores entre outros entraves que ocasionam perda de área e conseqüentemente um menor aproveitamento potencial de geração elétrica. O estudo feito pela ANEEL mostrado na Tabela 1, diz que o DF tem potencial de geração fotovoltaica, em telhado, de 3592 GWh/ano, potencial que é maior que o consumo residencial.

Para determinar a área necessária de instalação dos painéis (A_N), basta multiplicar o número de painéis (N_p) pela área do painel (A_p) conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Área necessária para instalação dos painéis Canadian Solar CS6K-270P

Bloco	$A_N = N_p \times A_p$	Área Disponível (m ²)
Situação 1 – Área Individual		
D	$A_N = 6 \times 1,63$	9,8
G	$A_N = 9 \times 1,63$	14,7
K	$A_N = 6 \times 1,63$	8,1
Situação 2 – Área Conjunta		
D+G+K	$A_N = 20 \times 1,63$	32,7

Conhecidos os dados de área de telhado para cada Bloco e seus respectivos número de painéis, percebeu-se que seria melhor concentrar em um único local a microgeração fotovoltaica, seguindo a situação 2 das tabelas 2, 7 e 8. Foi decidido

que os 20 painéis serão instalados no Bloco D. Essa decisão foi tomada, pois Resolução Normativa ANEEL nº687 dá a possibilidade de o consumidor utilizar os créditos em outras unidades cadastradas e que estejam na mesma área de concessão. Os três Blocos são de titularidade de uma mesma pessoa jurídica, se caracterizando como Autoconsumo Remoto.

4.4.7 Orientação dos painéis Fotovoltaicos

A melhor forma para instalar os painéis solares é orientando a sua face para o norte geográfico, cidades que estão abaixo da linha do equador têm que orientar o painel para o norte geográfico. Foi usado o programa *Google Earth* para determinar o norte geográfico do local de estudo, conforme a figura 29.



Figura 29 – Localização do norte geográfico no local de estudo [45]

Foi utilizado o software Helioscope, um programa para planejamento de painéis solares, para auxiliar na demonstração da orientação dos painéis

fotovoltaicos no Bloco D, local escolhido para a instalação da microgeração, conforme a figura 30.

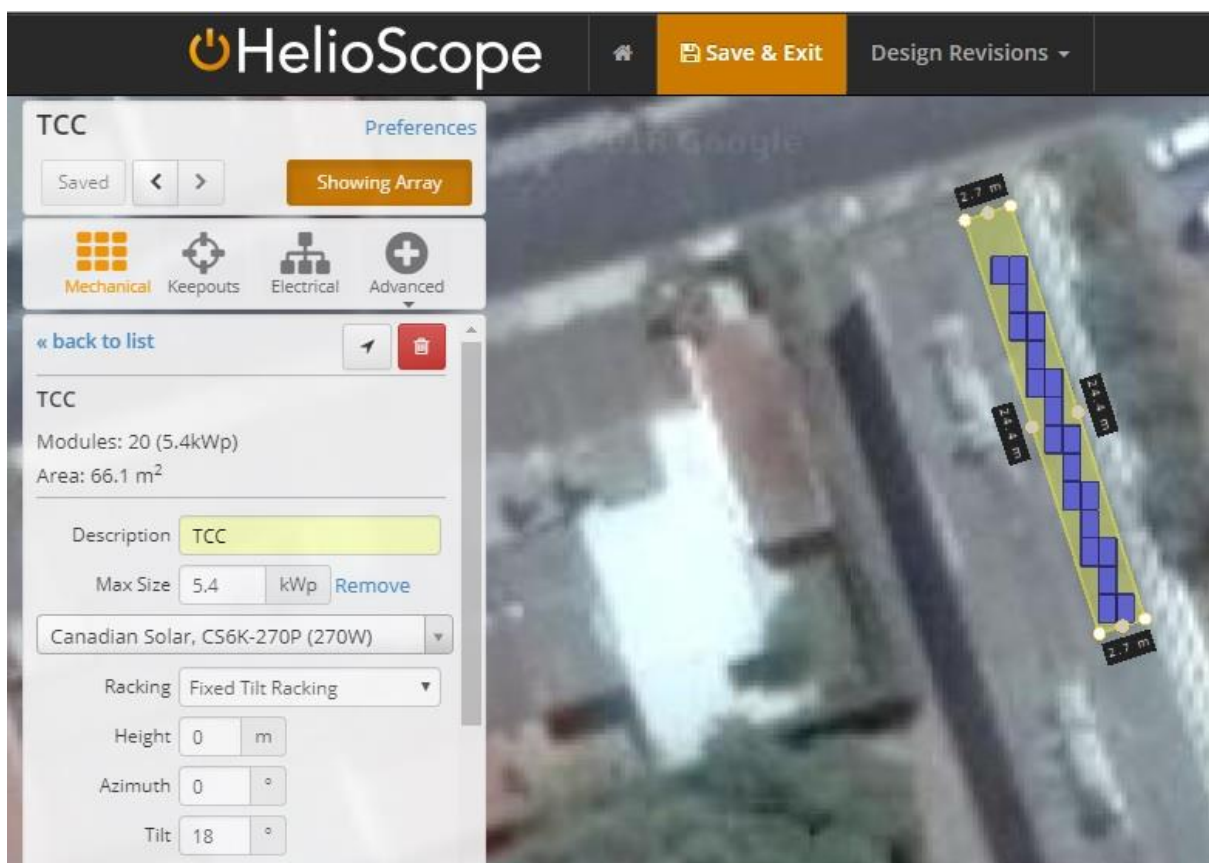


Figura 30 – Orientação dos painéis solares no Bloco D [49]

4.4.8 Dimensionamento do Inversor

Os inversores são importantes no sistema fotovoltaico conectado à rede, pois são eles que irão converter a corrente contínua (CC) produzida pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada (CA). A corrente que será injetada na rede pelo inversor deve ter o formato senoidal e estar em sincronia com a energia da distribuidora.

Para o dimensionamento do inversor, é importante saber a tensão e a corrente do sistema fotovoltaico que entrará no inversor e a potência de pico do conjunto de painéis, pois o inversor deve ser especificado para potência maior que a do sistema fotovoltaico.

Analisando individualmente cada Bloco, o inversor escolhido para os Blocos D e K que tem valores de potência próximos foi o Inversor ECOS2000 PLUS de 2 Kw [54]. Para o Bloco G, o modelo escolhido foi o Fronius Primo 3.0 de 3 Kw [55].

Nesse projeto, os painéis estarão ligados em série, formando uma *string*. Com os painéis ligados em série, as tensões de saída desse conjunto fotovoltaico será a soma das tensões de circuito aberto (V_{oc}) de cada painel e a corrente será a mesma que circulará em todo o sistema. Deve-se ter o cuidado para que a tensão de circuito aberto do *string* não ultrapasse a tensão máxima admitida na entrada do inversor. Para determinar o número mínimo e máximo de painéis ligados em série, deve-se calcular a tensão máxima admissível do inversor pela tensão de circuito aberto dos painéis e a tensão mínima de entrada do inversor pela tensão do painel, conforme a equação 5 e 6:

$$N_{max} \leq V_{max}(\text{inversor})/V_{oc}(\text{painel}) \quad (5)$$

Onde:

N_{max} = número máximo de painéis por *string*

V_{max} = máxima tensão de entrada (V)

V_{oc} = tensão de circuito aberto do painel (V)

$$N_{max} \leq 1000 \text{ V} / 37,9 \text{ V}$$

$$N_{max} \leq 26,38$$

$$N_{min} \geq V_{MPP}(\text{inversor}) / V_{MP}(\text{painel}) \quad (6)$$

Onde:

N_{min} = número mínimo de painéis por *string*

V_{MPP} = tensão mínima MP de entrada n inversor (V)

V_{MP} = tensão MP do painel (V)

$$N_{min} \geq 80 \text{ V} / 30,8 \text{ V}$$

$$N_{min} \geq 2,6$$

Assim, poderão ser ligados, em série, no máximo 26 painéis fotovoltaicos e o no mínimo 2 painéis fotovoltaicos. Como foram 20 painéis a quantidade total obtido

na tabela 7, a tensão de circuito aberto total será de 758 Volts, logo não haverá problema de sobretensão no inversor o que poderia causar danos ao equipamento.

Outro critério a ser analisado é a potência do inversor. Na tabela 8, foi obtido o valor de 5,4 kWp que é a potência instalada do sistema fotovoltaico proposto, então o inversor a ser escolhido deve ter uma potência maior ou igual ao do sistema fotovoltaico.

Segundo Villalva, é comum sobredimensionar e subdimensionar levemente o sistema fotovoltaico, pois a potência de pico só poderá ser atingida nas condições padrões de teste (STC), sendo que na maior parte do tempo o sistema fornece potência abaixo da sua capacidade nominal [1].

O sistema fotovoltaico proposto possui 20 painéis com tensão de circuito aberto total de 758 volts e potência instalada de 5,4 kWp. Com esses valores, o inversor escolhido foi o Fronius Primo 6.0-1 de 6 kW, seus dados técnicos estão listados na tabela 11.

O inversor escolhido suporta a tensão do sistema fotovoltaico de 758 Volts e corrente de 9,32 A.

Tabela 11 – Especificações do Inversor Fronius Primo 6 kW

Inversor Fronius Primo 6.0 – 1

Parâmetros de Entrada – CC	
Faixa de Tensão MPP	240 – 800 V
Máxima Tensão de Entrada	1000 V
Mínima Tensão de Entrada	80 V
Máxima Corrente de Entrada	18 A
Potência FV Recomendada	4,5 kWp a 5,5 kWp
Número de MPPT	2
Parâmetro de Saída – AC	
Tensão Nominal de Saída	6000 W
Máxima Corrente de Saída	26,1 A
Frequência	60 Hz
Conexão à Rede	180 - 270 V
Eficiência	97,8 %
Distorção Harmônica Total	< 5%

5. ANALISE ECONÔMICA

Nesta análise, foi levado em consideração o custo de cada um dos componentes fotovoltaicos apresentados nesse trabalho para cada Bloco e assim avaliar a atratividade da energia fotovoltaica.

Foi consultado um profissional da área e verificou-se o valor para Instalação e Projeto em torno de R\$ 8.000.

Foram considerados quatro cenários para a análise econômica desse trabalho:

- Cenário 1: Calcular o Payback com o valor 100% financiado e considerando uma inflação de 4,5% ao ano.
- Cenário 2: Calcular o Payback com o valor 50% financiado e considerando uma inflação de 4,5% ao ano.
- Cenário 3: Comparar o rendimento com outras aplicações financeiras.
- Cenário 4: Calcular o Payback com o valor 100% sendo de recursos de terceiros, considerando uma inflação de 4,5% ao ano e uma carência de três anos.

5.1 ANÁLISE DE CUSTO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE CADA BLOCO

O consumo de energia elétrica dos três Blocos é mostrado na tabela 12.

Tabela 12 – Consumo de Energia Elétrica dos Blocos D, G e K em kWh/mês

Bloco	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
D	270	280	280	270	250	300	260	240	290	250	280	300	272
G	480	440	400	480	460	520	420	400	420	400	460	460	425
K	230	230	240	290	220	230	200	200	240	200	220	210	227
D+G+K	980	950	920	1040	930	1050	880	840	950	850	960	970	943

5.1.1 Bloco D

Analisando individualmente o Bloco D com os dados já informados, temos na tabela 13:

Tabela 13 – Dados do Bloco D

Média de Consumo (kWh)	272
Número de Painéis	6
Potência de Pico (kWp)	1,62
Área de Instalação (m ²)	9,8

O custo de instalação para o sistema fotovoltaico do Bloco D, conforme a tabela 14 será:

Tabela 14 – Custo de Instalação para potência de 1,62 kW

Item	Quantidade	Preço Unitário	Valor Total
Painel Fotovoltaico	6	R\$ 569,00	R\$ 3.414,00
Inversor	1	R\$ 2.664,45	R\$ 2.664,45
Instalação e Projeto	1	R\$ 8.000	R\$ 8.000
Total			R\$ 14.078,45

O valor de R\$ 14.078,45 para o sistema fotovoltaico proposto de 1,62 kWp tem uma relação de 8,7 R\$/W.

5.1.2 Bloco G

A tabela 15 faz um resumo individual dos dados já apresentados do Bloco G:

Tabela 15 – Dados do Bloco G

Média de Consumo (kWh)	425
Número de Painéis	9
Potência de Pico (kWp)	2,43
Área de Instalação (m ²)	14,7

O custo de instalação do sistema fotovoltaico para o Bloco G, conforme a tabela 16, será:

Tabela 16 – Custo de Instalação para potência de 2,43 kW

Item	Quantidade	Preço Unitário	Valor Total
Painel Fotovoltaico	9	R\$ 569,00	R\$ 5.121,00
Inversor	1	R\$ 7.411,17	R\$ 7.411,17
Instalação e Projeto	1	R\$ 8.000	R\$ 8.000
Total			R\$ 20.532,17

O valor de R\$ 20.532,17 para o sistema fotovoltaico proposto de 2,43 KWp tem uma relação de 8,4 R\$/W.

5.1.3 Bloco K

A tabela 17 faz um resumo individual do Bloco K com os dados já apresentados anteriormente.

Tabela 17 - Dados do Bloco K

Média de Consumo (kWh)	227
Número de Painéis	5
Potência de Pico (kWp)	1,35
Área de Instalação (m ²)	8,1

O custo de instalação do sistema fotovoltaico para o Bloco K, conforme a tabela 18, será:

Tabela 18 - Custo de Instalação para potência de 1,35 kW

Item	Quantidade	Preço Unitário	Valor Total
Painel Fotovoltaico	5	R\$ 569,00	R\$ 2.845,00
Inversor	1	R\$ 2.664,45	R\$ 2.664,45

Instalação e Projeto	1	R\$ 8.000	R\$ 8.000
Total			R\$ 13.509,45

O valor de R\$ 13.509,45 para o sistema fotovoltaico proposto de 1,35 KWp tem uma relação de 10 R\$/W.

5.1.4 Bloco D+G+K

A tabela 19 faz um resumo individual dos dados já apresentados do Bloco G:

Tabela 19 – Dados do Bloco D+G+K

Média de Consumo (kWh)	944
Número de Painéis	20
Potência de Pico (kWp)	5,4
Área de Instalação (m ²)	32,7

A tabela 20 faz um resumo individual dos dados já apresentados dos Blocos D+G+K:

Tabela 20 – Custo de Instalação de um Sistema Fotovoltaico de 5,4 KWp

Item	Quantidade	Preço Unitário	Valor Total
Painel Fotovoltaico	20	R\$ 569,00	R\$ 11.380
Inversor	1	R\$ 10.517,37	R\$ 10.517,37
Instalação e Projeto	1	R\$ 8.000	R\$ 8.000
Total			R\$ 29.897,37

O valor de R\$ 29.897,37 para o sistema fotovoltaico proposto de 5,4 KWp tem uma relação de 5,5 R\$/W.

Observa-se na tabela 21, que o custo unitário do sistema fotovoltaico por unidade de potência (Wp) fica mais barato conforme a capacidade de geração aumenta. Estudos realizados pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), avaliou os preços na Alemanha para as faixas de potência de até 5kW, de 5-10Kw e 10-10Kw, respectivamente em R\$6,35, R\$5,60 e R\$5,50 [57]

Tabela 21– Custo unitário do Sistema Fotovoltaico por Watt-pico.

Bloco	Potência Instalada (Wp)	R\$/W pico?
D	1,62	8,7
G	2,43	8,4
K	1,35	10
D+G+K	5,4	5,5

No Brasil, os fabricantes e revendedores de módulos e inversores calculam o preço médio para faixa de até 5kW em R\$5,54/Wp, o que corresponde com o valor encontrado para a potência instalada para soma dos três blocos juntos (D+G+K).

A figura 31 mostra os preços médios residenciais por potência do gerador solar e comprovam que os valores para potência instalada de cada Bloco está dentro do praticado pelo mercado fotovoltaico.

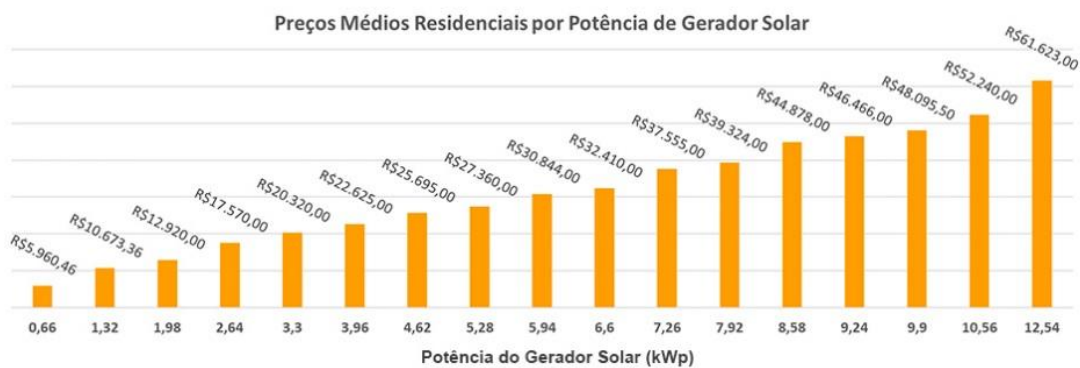


Figura 31 - Preço médio residencial por potência do gerador solar [57].

5.2 GERAÇÃO E CUSTO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Segundo Shayani[58], considerando o sistema interligado com uma eficiência aproximada de 84%, pode-se estimar o custo de energia e a geração anual com a insolação média anual (kWh/m².dia) e a potência de pico do sistema (kWp).

$$\text{Potência [kWp]} * \text{Insolação [h]} * \text{Eficiência} * 365 [\text{dias}] * 25 [\text{anos}] [7]$$

Para o Bloco D:

$$1,62 \text{ [kWp]} * 5,4 \text{ [h]} * 0,84 * 365 \text{ [dias]} * 25 \text{ [anos]} = 67 \text{ MWh}$$

Para o Bloco G:

$$2,43 \text{ [kWp]} * 5,4 \text{ [h]} * 0,84 * 365 \text{ [dias]} * 25 \text{ [anos]} = 100 \text{ MWh}$$

Para o Bloco K:

$$1,35 \text{ [kWp]} * 5,4 \text{ [h]} * 0,84 * 365 \text{ [dias]} * 25 \text{ [anos]} = 55,8 \text{ MWh}$$

Para D+G+K:

$$5,4 \text{ [kWp]} * 5,4 \text{ [h]} * 0,84 * 365 \text{ [dias]} * 25 \text{ [anos]} = 223,5 \text{ MWh}$$

O custo da energia solar é feito pela razão do valor total de instalação pela energia gerada, então:

Para o Bloco D:

$$\frac{14.078,45 \text{ [R\$]}}{67 \text{ [MWh]}} = 210,1 \text{ R\$/MWh}$$

Para o Bloco G:

$$\frac{20.532,17 \text{ [R\$]}}{100 \text{ [MWh]}} = 205,3 \text{ R\$/MWh}$$

Para o Bloco K:

$$\frac{13.509,45 \text{ [R\$]}}{55,8 \text{ [MWh]}} = 242,1 \text{ R\$/MWh}$$

Para o Bloco D+G+K:

$$\frac{29.897,37 \text{ [R\$]}}{223,5 \text{ [MWh]}} = 133,7 \text{ R\$/MWh}$$

5.3 CALCULO DA ENERGIA ECONOMIZADA COM O SISTEMA FOTOVOLTAICO EM 1 ANO.

Na tabela 22, a tarifa considerada para os cálculos é referente ao consumidor do Grupo B. Os três Blocos pertencem a ao grupo B3 (Poder Público), com tarifa no mês de novembro de 2018 em R\$/kWh 0,6658293 (Bloco D e K), e R\$/kWh 0,7162773 (Bloco G).

O intuito desse trabalho é analisar a contribuição do sistema fotovoltaico conectado à rede para cada Bloco.

No valor da tarifa já está incluso os impostos que incidem sobre ela, tais como o COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social), ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias) e PIS/PASEP (Programa de Integração Social).

Foi considerado o consumo médio mensal de cada Bloco, calculando o custo total da energia elétrica em um ano, conforme a tabela 22.

Tabela 22 – Custo Anual de Energia para os três Blocos.

BLOCO	Tarifa	Consumo Médio Mensal (kWh)	Custo Mensal (R\$)	Custo Anual (R\$)
D	0,6658293	173	R\$ 115,19	R\$ 1.382,26
G	0,7162773	345	R\$ 247,12	R\$ 2.965,39
K	0,6658293	126	R\$ 83,89	R\$ 1.006,73
D+G+K	0,785732	644	R\$ 506,01	R\$ 6.072,14

A economia gerada a partir da utilização da energia solar fotovoltaica pode ser obtida pela equação 2 e apresentada na tabela 23 [59]:

$$E_A = E_G \times T \quad (8)$$

E_A = Valor economizado durante um ano, em reais (R\$)

E_G = Energia Gerada pelo Sistema Fotovoltaico (kWh/ano)

T = Tarifa de energia cobrada pela CEB (R\$/kWh)

Tabela 23 – Economia anual gerada pelo Sistema FV

Bloco	Tarifa	Geração FV Anual (kWh)	Economia Anual (R\$)
D	0,6658293	3235,20	R\$ 2.154,09
G	0,7162773	4852,80	R\$ 3.475,95
K	0,6658293	2696,00	R\$ 1.795,08
D+G+K	0,785732	8625,10	R\$ 6.777,02

Esses valores encontrados são os valores que cada Bloco deixará de pagar anualmente de tarifa de energia por ter utilizado o sistema fotovoltaico.

5.4 FINANCIAMENTO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O crédito tem uma grande importância para alavancar o crescimento da utilização da energia solar nas residências, pois os investimentos iniciais ainda são altos fazendo que muitas pessoas não optem por esse tipo de energia, mas por falta de informação, a economia gerada pelo sistema solar, ajudará a pagar o financiamento devido ao valor economizado.

5.4.1 Fundo Clima (BNDES)

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) financia projetos de energia solar para geração própria de energia elétrica que atende pessoa física e jurídica sendo rural ou urbano, podendo as linhas de financiamento para energia fotovoltaica ser diferenciadas pelo porte do cliente. O BNDES liberou crédito para a instalação residencial de energia fotovoltaica. O Fundo Clima garante à pessoa física acesso ao financiamento para instalar sistemas fotovoltaicos. Os itens financiáveis devem ser novos e feitos no Brasil e o financiamento tem prazo de 12 anos para pagamento. A taxa básica de juros do BNDES chamada de Taxa de Longo Prazo (TLP) que é composta por uma parte fixa e uma variável. A parte fixa do TLP reflete o custo real de captação do BNDES sendo divulgada todo mês pelo

Banco Central e é a mesma desde a contratação até a quitação do financiamento A parte variável é a correção monetária pela inflação, sendo o IPCA o índice usado para essa correção [60].

Nesse trabalho, será usado a TLP de 7,28% que é a taxa usada para pessoa contratos firmados.

5.4.2 CDC Socioambiental Santander

O CDC Socioambiental, do Banco Santander, parcela em até 4 anos a compra de equipamentos para energia solar fotovoltaica, eficiência energética e hídrica, tratamento de resíduos e acessibilidade. O Santander disponibiliza linhas de financiamentos para que pessoas físicas instalem sistemas de geração solar fotovoltaica em suas propriedades. Assim, o valor pode ser parcelado ao longo dos anos. Há uma linha para aquisição do sistema fotovoltaico (placas, inversores e instalação) desde 2013. As taxas vão de 1,69% a 1,9% ao mês, e o prazo é de até 36 meses [61].

5.4.3 Caixa Econômica Federal

A Caixa econômica federal possui linhas de financiamentos que podem ser destinadas ao financiamento de equipamentos de energia fotovoltaica como Construcard, o Crédito Imóvel e o Crédito Pessoal Inteligente. As taxas de juros para as essas linhas partem de 1,45% a.m. e o prazo máximo pode chegar a 240 meses, com até 06 meses de carência [62].

5.5 DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO

Deve-se determinar a viabilidade ou não do projeto proposto, ou seja, se há um potencial do sistema fotovoltaico gerar uma renda econômica. Foram utilizados três métodos (TIR, VPL e Payback) para análise da rentabilidade e consequentemente determinar se o projeto é viável ou não economicamente.

5.5.1 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR representa a eficiência marginal do capital, é a taxa em que, empregada como a taxa de desconto no cálculo do VPL faz com que seu valor fique igual a zero, ou seja, é uma taxa usada para quando um investimento pode ter retorno igual a zero.

5.5.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Uma das técnicas de análise mais empregadas para a avaliação financeira de um projeto é o Valor Presente Líquido, que nada mais é do que a diferença entre os benefícios gerados pelo projeto e seus custos. Para o cálculo do VPL, os fluxos de caixa do projeto são trazidos a valor presente, descontados a uma determinada taxa de juros [63].

A expressão para o cálculo do VPL é dada pela Equação...

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

Onde:

I_0 = investimento inicial

F_{ct} = fluxo de caixa do projeto no período t

r = a taxa de desconto

t = o período em questão

n = o horizonte de análise do fluxo de caixa

Os casos considerados economicamente viáveis são os que apresentam VPL maior do que zero, ou seja, que as receitas do projeto superam o valor investido somado às despesas do projeto.

5.5.3 Payback

O Payback indica o tempo necessário para que se recupere o valor investido. É o principal método que medirá o tempo necessário para que a somatória das

parcelas anuais seja igual ao valor de investimento inicial [50]. Para Schubert, o Payback deve ser utilizado como parâmetro, pois irá medir, com base na geração de caixa, o tempo que o dinheiro investido será devolvido na forma de rendimento [51].

Para saber se vale a pena investir em sistema fotovoltaico, a tarifa de energia, cobrada pela Distribuidora, é um fator importante para análise do retorno do investimento em energia solar fotovoltaica. Quanto maior a tarifa, mais viável é a instalação do sistema solar. Os três Blocos fazem parte do Grupo B3, cuja tarifa média cobrada pela CEB, é de R\$/kWh 0,6658293 (Bloco D e K), e R\$/kWh 0,7162773 (Bloco G).

5.5.4 Resultados Encontrados

Foram realizados quatro cenários, levando em consideração uma inflação de 4,5% ao ano, taxa de 7,28% e um prazo de dez anos para cada cenário.

Cenário 1: Calcular o Payback com o valor 100% financiado e considerando uma inflação de 4,5% ao ano com prestação de R\$ 4.311,97, conforme a tabela 24.

Tabela 24 – Análise financeira para o cenário 1.

Cenário 1 - 100% Financiado				
ANO	FLUXO DE CAIXA	VR PRODUCAO - CUSTOS	PRESTAÇÃO	FC VALOR PRESENTE
0	-R\$29.897,37			
1	-R\$23.580,24	R\$6.317,13	-R\$4.311,97	-R\$27.892,21
2	-R\$13.672,42	R\$5.888,45	-R\$4.019,36	-R\$17.691,78
3	-R\$4.436,95	R\$5.488,86	-R\$3.746,61	-R\$8.183,56
4	R\$4.171,80	R\$5.116,39	-R\$3.492,36	R\$679,44
5	R\$12.196,37	R\$4.769,19	-R\$3.255,37	R\$8.941,00
6	R\$19.676,39	R\$4.445,56	-R\$3.034,46	R\$16.641,93
7	R\$26.648,82	R\$4.143,88	-R\$2.828,55	R\$23.820,27
8	R\$33.148,10	R\$3.862,68	-R\$2.636,60	R\$30.511,50
9	R\$39.206,34	R\$3.600,56	-R\$2.457,68	R\$36.748,65
10	R\$46.249,79	R\$3.356,23	-R\$3.687,23	R\$42.562,56

Para o cenário 1, onde 100% do valor de investimento será financiado, foi encontrado uma TIR de 14%, com uma inflação de 4,5%, VPL de R\$ 36.211,43 e Payback de 3 anos e 11 meses.

Cenário 2: Calcular o Payback com o valor 50% financiado e considerando uma inflação de 4,5% ao ano com prestação de R\$ 2,155,99, conforme a tabela 25.

Tabela 25 - Análise financeira para o cenário 2.

Cenário 2 - 50% Financiado				
ANO	FLUXO DE CAIXA	VR PRODUCAO - CUSTOS	PRESTAÇÃO	FC VALOR PRESENTE
0	-14.948,69			
1	-8.631,56	6.317,13	-2.155,99	-10.787,55
2	-869,80	5.888,45	-1.873,31	-2.743,10
3	6.365,25	5.488,86	-1.746,19	4.619,07
4	13.109,33	5.116,39	-1.627,69	11.481,64
5	19.395,76	4.769,19	-1.517,24	17.878,53
6	25.255,60	4.445,56	-1.414,28	23.841,32
7	30.717,78	4.143,88	-1.318,30	29.399,48
8	35.809,31	3.862,68	-1.228,84	34.580,46
9	40.555,32	3.600,56	-1.145,45	39.409,86
10	44.979,27	3.356,23	-1.067,72	43.911,54

Para o cenário 2, onde 50% do valor de investimento será financiado, foi encontrado uma TIR de 39%, com uma inflação de 4,5%, VPL de R\$ 101.607,76 e Payback de 2 anos e 2 meses.

Cenário 3: Comparação com outras aplicações financeiras

Para o cenário 3, onde os recursos são próprios, teríamos que saber o custo oportunidade, ou seja, antes meu dinheiro estava em uma dada aplicação e agora está no painel fotovoltaico. Foi calculada a rentabilidade do sistema fotovoltaico, onde foi tomado o primeiro ano de geração com uma economia de R\$ 6.777,02. A rentabilidade do sistema fotovoltaico é dada por:

Rentabilidade = Economia Gerada no Ano/Valor Total do Sistema

Rentabilidade = 6.777,02/29.897,37

Rentabilidade = 0,2266 = 22,66%

Fazendo uma comparação com o desempenho de aplicações financeiras em 2017 (ver figura 32) e a rentabilidade do sistema fotovoltaico de estudo, pode-se concluir que o investimento de baixo risco, como é o do sistema fotovoltaico, tem

uma ótima rentabilidade, visto que as projeções de geração do sistema dependem das condições climáticas que são abundantes no país.

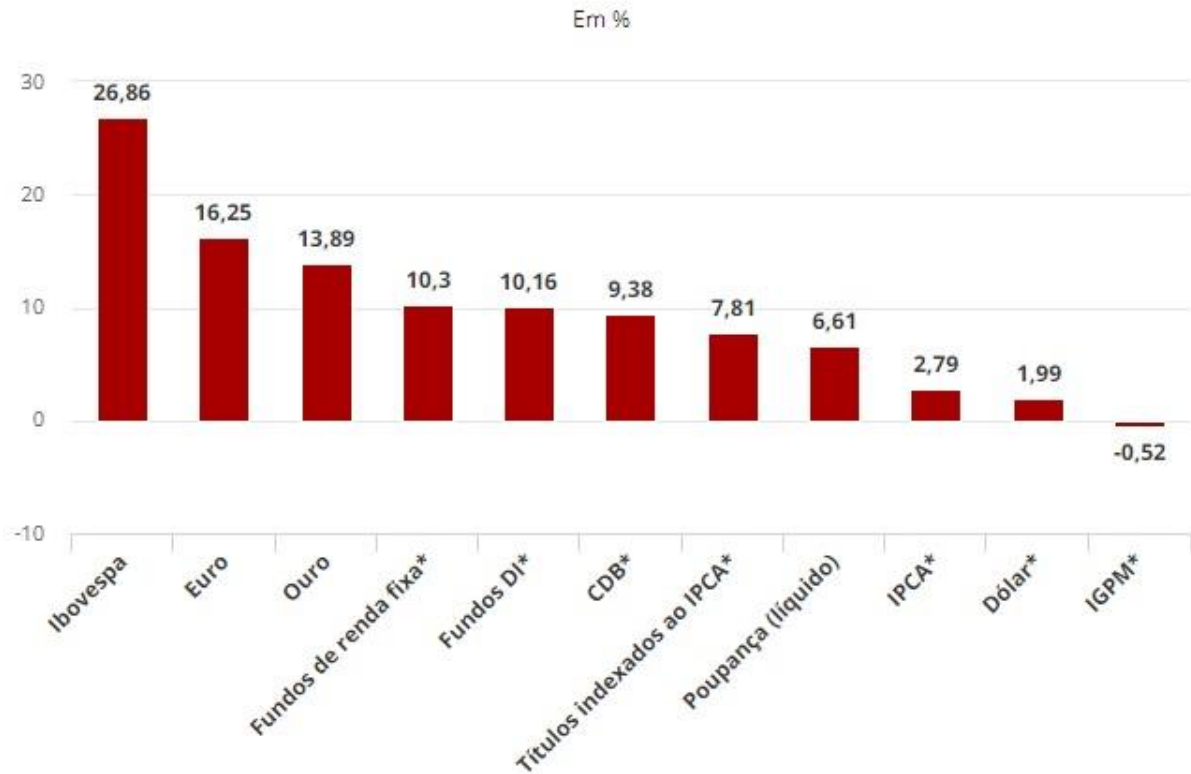


Figura 32 – Desempenho das aplicações financeiras em 2017 [64].

Cenário 4: Calcular o Payback com o valor 100% sendo de recursos de terceiros, considerando uma inflação de 4,5% ao ano e uma carência de três anos, conforme a tabela 26.

Tabela 26 - Análise financeira para o cenário 4.

Cenário 4 - 100% Financiados por Terceiros							
ANO	FLUXO DE CAIXA	VR PRODUÇÃO - CUSTOS		PRESTAÇÃO	FC VALOR PRESENTE		
0	-R\$ 29.897,37						
1	-R\$ 32.073,90	R\$ 7.425,12		R\$ -	-R\$		24.648,78
2	-R\$ 34.408,88	R\$ 7.759,25		R\$ -	-R\$		26.649,63
3	-R\$ 18.541,21	R\$ 8.108,42		-R\$ 3.843,56	-R\$		22.384,77
4	-R\$ 13.911,48	R\$ 8.473,30		-R\$ 3.843,56	-R\$		17.755,04
5	-R\$ 8.900,44	R\$ 8.854,59		-R\$ 3.843,56	-R\$		12.744,00
6	-R\$ 3.490,95	R\$ 9.253,05		-R\$ 3.843,56	-R\$		7.334,51
7	R\$ 2.334,93	R\$ 9.669,44		-R\$ 3.843,56	-R\$		1.508,63
8	R\$ 8.595,93	R\$ 10.104,56		-R\$ 3.843,56	R\$		4.752,37
9	R\$ 15.311,64	R\$ 10.559,27		-R\$ 3.843,56	R\$		11.468,08
10	R\$ 22.502,51	R\$ 11.034,43		-R\$ 3.843,56	R\$		18.658,95

Para o cenário 4, onde 100% do valor de investimento será financiado por terceiros, foi encontrado uma TIR de 16%, com uma inflação de 4,5%, VPL de R\$ 25.294,41 e Payback de 6 anos e 3 meses, pois há uma carência de 3 anos.

Valeria fazer uma análise e comparação entre os 5 cenários e comparação com as diferentes fontes de financiamento para verificar qual é a mais atrativa.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado dimensionamento fotovoltaico para três Blocos residenciais (gerando 100% do que consome) que se encontra em Brasília, levando em consideração somente o seu consumo (iluminação, sistema de câmeras, alarmes entre outros) e não dos seus moradores. Foram levados em consideração os dados de consumo de energia elétrica de cada prédio, a radiação solar incidente na cidade de Brasília, a escolha do painel fotovoltaico e inversor, a área disponível de telhado e a melhor orientação dos painéis.

Com o dimensionamento feito para cada Bloco, percebeu-se que poderia utilizar a área de telhado de um dos prédios para gerar toda a energia dos três Blocos juntos, então foi escolhido o Bloco D para ser o prédio para receber a microgeração de energia fotovoltaica conectada à rede. Como os três Blocos tem o mesmo CNPJ, logo podem ser caracterizadas como Autoconsumo Remoto que são unidades consumidoras, com o mesmo titular, que estão em locais diferentes, porém dentro da mesma área da concessionária de energia (CEB).

O sistema de geração fotovoltaica de estudo tem uma potência de 5,4 kW e uma geração de 8.625 kWh/ano. Serão 20 painéis fotovoltaicos de 270W e um inversor de 6 kW.

Realizaram-se quatro cenários para a viabilidade do sistema e constatou-se que para o cenário 1, 2 e 4 do projeto de estudo são viáveis economicamente, onde foi encontrado uma TIR de 14%,39% e 16%, VPL de R\$ 36.211,43, R\$ 101.607,76 e R\$25.294,41 e Payback de 3 anos e 11 meses, 2 anos e 2 meses e 6 anos e 3 meses para cada cenário, respectivamente. O cenário 3, por utilizar recursos próprios, fez-se uma comparação entre a rentabilidade do projeto de estudo com a

rentabilidade de outras aplicações financeiras. Obteve-se uma rentabilidade de 22,66% para o sistema fotovoltaico, sendo um investimento de baixo risco.

O sistema fotovoltaico de estudo é viável economicamente, onde a TIR, VPL e Payback foram apresentados e comprovaram a viabilidade do projeto.

Para trabalhos futuros, são indicados estudos relevantes sobre a competitividade da energia solar fotovoltaica conectada à rede, a expansão do financiamento para o setor e maiores incentivos governamentais que favoreçam a sociedade a investir nesse tipo de energia limpa.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica. CONCEITOS E APLICAÇÕES.** São Paulo: Érica Ltda, 2012.

[2] EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica.** Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>. Acessado em: 3 de Abril de 2018.

[3] PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L. & RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** São José dos Campos. INPE.2006.

[4] SILVA, R. M. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, Fevereiro/2015 (Texto para Discussão nº 166). Disponível em: <www.senado.leg.br/estudos>. Acesso em 3 de Abril de 2018.

[5] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de Abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 3 de Abril de 2018.

[6] E. R. SCHOFFEL. **Agrometeorologia.** 2016.

[7] INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** PEREIRA, E.B; MARTINS, F.R; ABREU, S.L; RÜTHER,R. – São José dos Campos : INPE, 2006.

[8] ENERGIA SOLAR. **Fcsolar.** Disponível em: <<http://www.fcsolar.eco.br/aprenda-aqui>>. Acessado em: 09/04/2018.

[9] VILLALVA, MARCELO GRADELLA. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações.** São Paulo. Editora Érica, 2013.

[10] WAGNER.A.L. **Irradiância Solar.** Disponível em:<<http://hccengenharia.com.br/a-irradiancia-solar-no-rio-grande-do-sul-e-suficiente-para-gerar-energia-solar/grafico-1-irradiancia-solar/>>. Acessado em: 11/04/2018.

[11] UFPR. **Movimento da terra.** Disponível em: <<https://sociologiapoliticaufpr.files.wordpress.com/2014/03/estac3a7c3b5es-do-ano1.jpg>>. Acessado em: 11/04/2018.

[12] SEBRAE. **Encadeamento Produtivo**. Disponível em: <www.m.sebrae.com.br/Sebrae/>. Acesso em: 15/04/2018.

[13] ABINEE. **A cadeia produtiva no Brasil**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acessado em: 16/04/2018.

[14] ENERGY GREEN BRASIL. **Energia Fotovoltaica impulsiona cadeia produtiva**. Disponível em < <http://energygreenbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/06/apresentacao-estudo.pdf> >. Acessado em: 16/04/2018.

[15] ABSOLAR. **Energia Fotovoltaica impulsiona cadeia produtiva**. Disponível em <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-fotovoltaica-impulsiona-.html>>. Acessado em: 16/04/2018.

[16] LIASA. **Silício Metálico**. Disponível em: <<http://www.liasa.com.br/silicio-metalico/#oqueesilicio>>. Acessado em: 18/04/2018.

[17] PORTAL SOLAR. **Placa Fotovoltaica**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 18/04/2018.

[18] ENERGIA FOTOVOLTAICA. **Ângulos Solares**. Disponível em: <<https://www.rinnovabile.com.br/energiafotovoltaica>>. Acessado em: 28/04/2018.

[19] SOLAR BRASIL. **Conceito de Energia Solar**. Disponível em: <<http://www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar/130-conceitos-de-energia-solar-geometria-solar-movimentos-de-rotacao-translacao-solsticio-e-equinocio>>. Acessado em: 29/04/2018.

[20] PORTAL ENERGIA. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: < <https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf> >. Acessado em: 29/04/2018.

[21] SOLARGIS. **Mapas de Radiação**. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>>. Acessado em: 30/04/2018.

[22] PORTAL SOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acessado em: 01/05/2018.

[23] BNDES. **Desenvolvimento Tecnológico e Inserção da energia solar no Brasil**. Revista do BNDES, v. 40, dez/2013, pp. 85-114. Disponível em:

<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/c/onhecimento/revista/rev4003.pdf>. Acesso em 01/05/2018.

[24] ENERGIES RENOUVELABLES. **Fifteenth Inventory – Edition 2013**. Disponível em: <http://www.energies-renouvelables.org/observer/html/inventaire/Eng/preface.asp>. Acessado em: 01/05/2018.

[25] ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20482,%20de%202012%20-%20bip-junho-2012.pdf>>. Acessado em: 01/05/2018.

[26] ANEEL. **Resolução Normativa nº 687/2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acessado em: 01/05/2018.

[27] CAMARA LEGISLATIVA. **Energia Solar no Brasil: Situações e Perspectivas**. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/a-camara/documentos-e-pesquisa/estudos-e-notas-tecnicas/areas-da-conle/tema16/2012_1261.pdf>.

Acessado em: 01/05/2018.

[28] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa de Geração Distribuída**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1942329/Portaria_n_538-2015/49ab0708-5850-404c-a924-2760bbd22bbc?version=1.1>. Acessado em: 01/05/2018.

[29] NET METRING. **Sistema de Tarifação net metering**. Disponível em: <<https://fomatheus.files.wordpress.com/2015/11/sem-tc3adtulo.png>>. Acessado em: 01/05/2018.

[30] AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9. Acessado em: 01/05/2018.

[31] ELETRONICA. **Painel Fotovoltaico**. Disponível em: <<https://www.electronica-pt.com/painel-solar-fotovoltaico>>. Acessado em: 07/05/2018.

[32]]MINHA CASA SOLAR. **Painel Solar**. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-de-270w-policristalino-canadian-solar-cs6k-270p-79117>>. Acessado em: 08/05/2018.

[33] PORTAL ENERGIA. **Energia Fotovoltaica. Manual sobre tecnologias, projectos e instalação.** Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>. Acessado em: 09/05/2018.

[34] ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia Solar Fotovoltaica Guia Prático.** Disponível em: < <https://mbecovilas.files.wordpress.com/2011/06/energia-solar-fotovoltaica.pdf>>. Acessado em: 09/05/2018.

[35] PORTAL SOLAR. **Inversores.** Disponível em:< <https://www.portalsolar.com.br/inversor-grid-tie.html>>. Acessado em: 11/05/2018.

[36] MINHA CASA SOLAR. **Inversor Grid-Tie.** Disponível em:< <https://www.minhacasasolar.com.br/produto/inversor-grid-tie-6-0kw-com-wi-fi-fronius-primio-6-0-79234?atributo=178:UNICA&atributo=25:U&atributo=26:UNICA>>. Acessado em: 12/05/2018.

[37] PORTAL SOLAR. **Microinversor.** Disponível em:< <https://www.portalsolar.com.br/micro-inversor-solar-grid-tie.html>>. Acessado em: 12/05/2018.

[38] NEOSOLAR. **Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede Elétrica.** Disponível em:< <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes> >. Acessado em: 12/05/2018.

[39] ABNT, **Norma Brasileira - Instalações Elétricas de Baixa Tensão NBR 5410:2004 versão corrigida, 2008**

[40] **String box.** Disponível em: <http://www.phb.com.br/produtos/solar/StringBox/StringBox_mono_br.aspx>. Acessado em: 15/05/2018.

[41] NEOASOLAR. **Conector MC4.** Disponível em:< <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/conector-mc4/>>. Acessado em: 15/05/2018.

[42] AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resumo por Tipo de Geração.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acessado em: 27/05/2018.

[43] AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resumo por Classe de Consumo.** Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Classe.asp>. Acessado em: 27/05/2018.

[44] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Nota Técnica DEA 19/14 – Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos.** Rio de Janeiro, outubro/2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA.pdf>>. Acesso em: 27/05/2018

[45] Google Earth. Disponível em: < <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/> >. Acessado em 22/05/2018.

[46] SunData. **CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acessado em:29/05/2018.

[47] **Minha Casa Solar.** Disponível em: < <https://www.minhacasasolar.com.br/painel-solar-fotovoltaico> >. Acessado em: 03/06/2018.

[48] MINHA CASA SOLAR. **Datasheet Canadian Solar.** Disponível em: <http://recursos.minhacasasolar.com.br/MediaCenter/EN_CS6K-P_en-v5.54.pdf>. Acessado em: 03/06/2018.

[49] Helioscope. Disponível em: < https://www.helioscope.com/designer/1421592/field_segments/5417210>. Acessado em: 17/06/2018.

[50] GUIMARAES, A.M (2012). **Estudo da Viabilidade de Investimentos em uma Franquia de Ensino Profissionalizante. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia.**

[51] SCHUBERT, Pedro. **Análise de investimentos e taxa de retorno.** São Paulo: Ática,1989, 99p. (Princípios;167).

[52] INEE. **Instituto Nacional de Eficiência Energética.** Disponível em: <http://www.inee.org.br/eficiencia_o_que_eh.asp?Cat=eficiencia>. Acessado em: 09/09/2018.

[53] ABESCO. **Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia.** Disponível em:< <http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acessado em: 09/09/2018.

[54] MINHA CASA SOLAR. **Inversor 2 Kw.** Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br//produto/inversor-grid-tie-2-0kw-com-wi-fi--ecosolys-ecos2000-plus-79066>>. Acessado em: 17/09/2018.

[55] MINHA CASA SOLAR. **Inversor 3 Kw.** Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/inversor-grid-tie-3-0kw-com-wi-fi-fronius-primo-3-0-79231>>. Acessado em: 17/09/2018.

[56] MIRANDA, A. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede.** Projeto de Graduação–UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil, 2014. 39, 71

[57] INSTITUTO IDEAL. **Geração Distribuída.** Disponível em <<http://institutoideal.org/o-mercado-brasileiro-de-geracao-distribuida-fotovoltaica-edicao-2018/>>: Acessado em: 16 de novembro de 2018.

[58] SHAYANI, R.A.; OLIVEIRA, M. A. G.; CAMARGO, I.M.T. **Comparação do Custo entre Energia Solar Fotovoltaica e Fontes Convencionais.**

[59] LISITA JUNIOR, O. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso de 3 kWp instalados no estacionamento do IEEE-USP.** 2005. 87p. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração, Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo 2005. Disponível em:<http://lsf.iee.usp.br/lfs/pdf/mestrado/Mestrado_Orlando_Lisita.pdf>. Acessado em: 27 de novembro de 2018.

[60] ABSOLAR. **Financiamento de energia renovável.** Disponível em <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/bndes-vai-lancar-financiamento-de-energia-renovavel-para-empresas.html>>. Acessado em: 30 de novembro de 2018.

[61] SANTANDER. **Financiamento Santander para energia solar fotovoltaica.** Disponível em: <<https://sustentabilidade.santander.com.br/pt/Produtos-e-Servicos/Paginas/Santander-Financiamentos.aspx>>. Acessado em: 30 de novembro de 2018.

[62] ABSOLAR. **Liberação de crédito para pessoa física.** Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/bancos-ainda-avaliam-como-sera-liberacao-de-credito-do-bndes-para-pessoa-fisica-instalar-energia-sol.html>>. Acessado em: 01 de dezembro de 2018.

[63] BREALEY; MYERS; ALLEN, 2011. **Principles of corporate finance**. 10 ed. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin, 2011.

[64] Desempenho das aplicações financeiras em 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/educacao-financeira/noticia/ibovespa-foi-melhor-investimento-em-2017-veja-ranking-de-aplicacoes.ghtml>>. Acessado em: 9 de dezembro de 2018.