

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

MAGDALENA PEREYRA

**ESTUDO PARA A INSTALAÇÃO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA COM INJEÇÃO À REDE EM UMA RESIDÊNCIA DA
PROVÍNCIA DE BUENOS AIRES**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2018

MAGDALENA PEREYRA

**ESTUDO PARA A INSTALAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COM
INJEÇÃO À REDE EM UMA RESIDÊNCIA DA PROVÍNCIA DE BUENOS AIRES**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

MAGDALENA PEREYRA

ESTUDO PARA A INSTALAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COM INJEÇÃO À REDE EM UMA RESIDÊNCIA DA PROVÍNCIA DE BUENOS AIRES

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 24 de setembro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A aluna foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Romildo Alves dos Prazeres

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo
UTFPR

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

RESUMO

PEREYRA, Magdalena. **Estudo para a instalação de energia solar fotovoltaica com injeção à rede em uma residência da Província de Buenos Aires**. 2018. 48 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho aborda o estudo de geração distribuída de energia elétrica, com a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma residência localizada no Município de *Tigre*, na Província de *Buenos Aires*. Com os dados de irradiação obtidos na localização, foi calculado um sistema fotovoltaico capaz de suprir a energia consumida pela residência, consumindo da rede durante os períodos de menor geração e injetando o excedente à rede nos períodos de maior geração. Com dados de fornecedores locais e das tarifas da concessionária de energia elétrica na região, a análise econômica apresentou como resultado um tempo de retorno de investimento de 10 anos e nove meses. Com os dados do fator de emissão de CO₂ na rede elétrica argentina, a análise ambiental apresentou uma redução das emissões de CO₂ de 4,21 toneladas anuais.

Palavras chave: sistema fotovoltaico conectado à rede, redução das emissões de CO₂, geração distribuída de energia elétrica.

ABSTRACT

PEREYRA, Magdalena. **Study on the installation of solar photovoltaic energy with injection to the electric grid in a residence of Buenos Aires Province**. 2018. 48 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The present work studies the distributed generation of electrical energy with the installation of a grid connected photovoltaic system, in a house located at the Municipality of Tigre, Buenos Aires Province. With the irradiation data obtained for that site, a photovoltaic system capable of generating the total electrical energy consumption of the house will be calculated; where energy will be obtained from the grid on periods with less generation, and the excess of energy generated will be injected the grid on periods of more generation. With local suppliers data, and the electrical energy rates of the region, the economical analysis will give as a result a payback of 10 years and 9 months. With the data of the CO₂ emission factor of the argentinian electric grid, the environmental analysis will give as a result a reduction on the CO₂ emissions of 4,21 tons per year.

Key words: grid connected photovoltaic system, reduction of CO₂ emissions, distributed generation of electric energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Geração de energia elétrica na Argentina durante o ano 2015.....	13
Figura 2 – Componentes principais de uma usina termoelétrica de carvão.	14
Figura 3 – Componentes da Radiação Solar: difusa, direta e albedo	18
Figura 4 – Processo de interação da radiação solar com os principais constituintes atmosféricos.....	19
Figura 5 – Estrutura de uma célula fotovoltaica	20
Figura 6 – Células fotovoltaicas de p-Si	22
Figura 7 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica	23
Figura 8 – Local escolhido para comparar os dados de irradiação dos diferentes atlas	25
Figura 9 - <i>Global Solar Atlas</i> para as coordenadas escolhidas no Parque Barigui ...	26
Figura 10 - Localização da residência em estudo	28
Figura 11 - Planta de tetos da residência em estudo	28
Figura 12- Detalhe da lage onde será instalado o painel solar fotovoltaico	29
Figura 13 - Resultado do <i>Global Solar Atlas</i> para as coordenadas da residência em estudo.	30
Figura 14 - Especificações técnicas do <i>Panel Solar FIASA® 315W - 24 V</i>	33
Figura 15 – Especificações técnicas do inversor <i>On Grid FRONIUS PRIMO 6.0-1 208-240</i>	34
Figura 16 – Suporte para os módulos.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – G_{HI} fornecido pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar	25
Tabela 2 - G_{TI} fornecido pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar	26
Tabela 3 – Consumo de energia elétrica na residência em estudo	29
Tabela 4 – Resultado do <i>Global Solar Atlas</i> da energia gerada por um painel de 1kWp com diferentes ângulos de inclinação, no local de estudo.	32
Tabela 5 – Custos dos equipamentos	35
Tabela 6 – Dados de irradiação inclinada média diária no sitio mais austral do Brasil	36
Tabela 7 – Dados de irradiação inclinada média mensal no sitio mais austral do Brasil	36
Tabela 8 – Dados calculados de irradiação mensal na residência em estudo	37
Tabela 9 – Energia gerada mensalmente pelos painéis fotovoltaicos na residência em estudo.	37
Tabela 10 – Dados de consumo e preços na residência em estudo	38
Tabela 11 – Preços calculados para um período de um ano segundo o quadro tarifário vigente.....	40
Tabela 12 – Irradiação e geração de energia na residência em estudo	41
Tabela 13 – Custo da energia com instalação do painel solar.	41
Tabela 14 – Cálculo de retorno do investimento	42
Tabela 15 – Valor da energia que viabiliza a instalação de um SFCR.....	43
Tabela 16 – Fator de emissão de CO ₂ na rede elétrica argentina.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – As fontes de energia e sua classificação.....	13
Quadro 2 - Quadro de tarifas vigente	39

LISTA DE FORMULAS

Equação 1 – Potência do sistema fotovoltaico	30
Equação 2 - Cálculo da potência do sistema fotovoltaico	31
Equação 3 – Cálculo do <i>Performance Ratio</i> utilizado pelo <i>Global Solar Atlas</i>	31
Equação 4 – Energia gerada.....	36
Equação 5 – Economia na conta de energia com análise de <i>payback</i> simples	43
Equação 6 – Redução de CO ₂	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

O ₃	Ozônio
O ₂	Oxigênio
CO ₂	Dióxido de Carbono
Si	Silício
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
a-Si	Silício amorfo
μ-Si	Silício microcristalino
Te	Telúrio
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
I	Índio
Ga	Gálio
Se	Selênio
FODIS	<i>Fondo para la Generación Distribuida de Energías Renovables</i>
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
G _{HI}	Irradiação Global Horizontal
G _{TI}	Irradiação Global Inclinada
PV _{OUT}	Produtividade
P _{FV}	Potência fotovoltaica
PR	<i>Performance Ratio</i>
OPTA	Ângulo ótimo
V _{OC}	Tensão de circuito aberto
V _{MPP}	Tensão de máxima potência
I _{MPP}	Corrente de máxima potência
STC	<i>Standard Testing Conditions</i>
\$ARG	Peso Argentino
ENRE	<i>Ente Nacional Regulador de la Energía</i>
MtCO ₂ eq	Milhões de toneladas de CO ₂ equivalente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA.....	15
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	15
1.3	PROBLEMAS E PREMISSAS	15
1.4	OBJETIVOS	16
1.4.1	Objetivo Geral	16
1.4.2	Objetivos Específicos	16
1.5	JUSTIFICATIVA.....	16
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	RADIAÇÃO SOLAR.....	18
2.1.1	Irradiância.....	19
2.1.2	Irradiação.....	20
2.2	TECNOLOGIAS DOS MODULOS FOTOVOLTAICOS.....	20
2.2.1	Células fotovoltaicas.....	20
2.2.2	Tipos de células fotovoltaicas.....	21
2.2.3	Módulos de p-Si.....	21
2.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (SFCR).....	22
2.4	RADIAÇÃO SOLAR NO MUNICÍPIO DE TIGRE, NA ARGENTINA	23
2.5	COMPARAÇÃO DOS DADOS DOS DOIS ATLAS SOLARES.....	24
2.6	FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS NA ARGENTINA.....	27
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	LEVANTAMENTO DE DADOS DA RESIDÊNCIA	28
3.2	DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	30
3.2.1	Dimensionamento pelo <i>Global Solar Atlas</i>	30
3.2.1.1	Dados fornecidos pelo <i>Global Solar Atlas</i>	30
3.2.1.2	Performance Ratio utilizado pelo <i>Global Solar Atlas</i>	31
3.2.1.3	Ângulo ótimo calculado pelo <i>Global Solar Atlas</i>	32
3.3	ESCOLHA DOS MÓDULOS E DOS INVERSORES	32
3.3.1	Escolha dos módulos.....	32
3.3.2	Escolha do inversor	34
3.3.3	Escolha do suporte	34
3.4	ANÁLISE ECONÔMICA	35
3.4.1	Custos dos equipamentos	35
3.4.2	Energia gerada pelo painel.....	35
3.4.3	Energia gerada mensalmente pelo painel	36
3.4.4	Custo da energia	37
3.4.5	Custo da energia com a instalação do painel solar	40
3.4.6	Cálculo do retorno do investimento	42
3.4.7	Calculo dos custos necessários para conseguir um retorno de investimento menor	43
3.5	ANÁLISE AMBIENTAL	44
3.5.1	Fator de emissão de CO ₂ na rede elétrica argentina.....	44
3.5.2	Cálculo da redução de emissões de CO ₂ na residência em estudo.	44
4	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	46
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

As fontes energéticas, apresentam-se em diferentes formas na natureza. Elas se caracterizam por apresentar uma disponibilidade natural de energia, mas geralmente é necessário fazer transformações em outro tipo de energia para seu uso final (EPE, 2005 apud TIEPOLO, 2015).

A energia na forma direta como é apresentada pela natureza, é definida como energia primária. As principais fontes de energia primária são o petróleo, o gás natural, o carvão, a lenha, o urânio, a energia hídrica, a energia eólica, a energia solar. A maior parte destas energias não são consumidas diretamente na forma em que são apresentadas, elas precisam ser transformadas em outro tipo de energias (EPE, 2005 apud TIEPOLO, 2015).

A energia secundária é aquela resultante do processo de transformação das energias primárias. Exemplos de energias secundárias são a gasolina, o óleo diesel, o gás liquefeito de petróleo, o álcool e a eletricidade (EPE, 2005 apud TIEPOLO, 2015). O presente estudo vai se focar na geração de eletricidade, utilizando como fonte primária a energia solar.

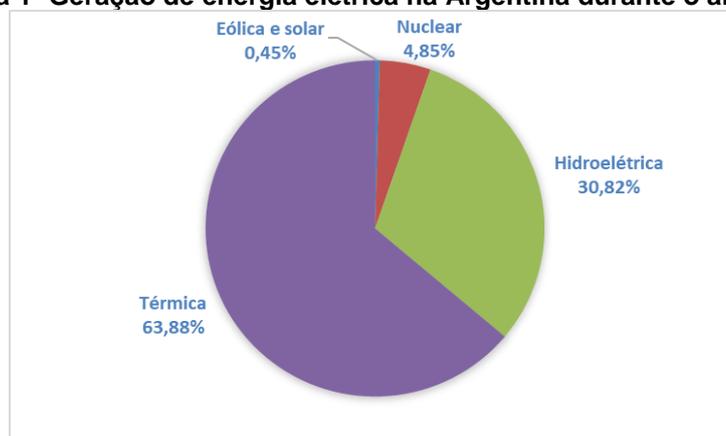
Dentro das fontes primárias de energia, as mesmas podem ser renováveis ou não renováveis. Quando a reposição da fonte de energia requer um horizonte de tempo geológico, elas são consideradas não renováveis. As fontes renováveis são repostas imediatamente pela natureza (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). No Quadro 1 mostra-se a classificação das diferentes formas de energia.

Quadro 1 – As fontes de energia e sua classificação

Fontes		Energia primária	Energia secundária	
Não renováveis	Fósseis	Carvão mineral	Termoeletricidade, calor, combustível para transporte	
		Petróleo e derivados		
		Gás natural		
	Nuclear	Materiais fósseis	Termoeletricidade, calor	
Renováveis	“Tradicionais”	Biomassa primitiva: lenha de desmatamento	Calor	
	“Convencionais”	Potenciais hidráulicos de médio e grande porte	Hidroeletricidade	
		Potenciais hidráulicos de pequeno porte		
	“Novas”	Biomassa “moderna”: lenha replantada, culturas energéticas (cana de açúcar, óleos vegetais)	Biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoeletricidade, calor	
		Outros	Energia solar	Calor, eletricidade, fotovoltaica
			Geotermal	Calor, eletricidade
			Eólica	Eletricidade
Mareomotriz e das ondas				

Fonte: GOLDEMBERG; LUCON, 2007.

A matriz elétrica da Argentina é composta principalmente por energia térmica (ou termoeletricidade, segundo a classificação de Goldemberg), sendo esta proveniente majoritariamente de fontes fósseis. Na Figura 1 mostra-se a matriz elétrica da Argentina.

Figura 1- Geração de energia elétrica na Argentina durante o ano 2015

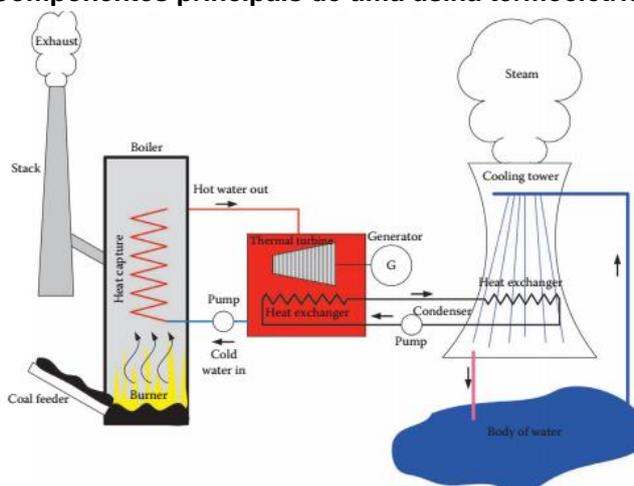
Fonte: Adaptado de *Ministerio de Energía y Minería – República Argentina, 2016*

As fontes fósseis são formadas a partir de plantas e animais mortos enterrados na crosta terrestre por milhões de anos sob pressão e calor. Eles são compostos de elementos de alto conteúdo de carbono e hidrogênio, como petróleo, gás natural e carvão. Elas são consideradas não renováveis pois sua formação leva milhões de anos (EL-SHARKAWI, M.A., 2013).

O processo de geração de energia elétrica a partir de fontes fósseis se mostra na figura 2. O combustível é queimado para aquecer água dentro do boiler. Esta água é transformada em vapor de água com alta pressão e temperatura. O vapor entra na turbina a alta velocidade, batendo nas pás da turbina e fazendo ela girar. O eixo da turbina, conectado com o eixo do gerador, faz o gerador girar também e, deste jeito, gerar a eletricidade (EL-SHARKAWI, M.A., 2013).

Durante a queima de combustível, são emitidas à atmosfera contaminantes como dióxido de carbono (CO_2), entre outros, que contribuem ao efeito estufa. Na Figura 2 é descrito o processo de geração de energia a partir de fontes fósseis.

Figura 2 – Componentes principais de uma usina termoeletrica de carvão.



Fonte: EL-SHARKAWI, M.A., 2013

Nos últimos anos, a promoção da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis foi um objetivo estratégico do Governo Argentino.

No ano 2015 se aprovou a lei N°27.191, modificadora da lei N°26.190: *“RÉGIMEN DE FOMENTO NACIONAL PARA EL USO DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA DESTINADA A LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.”*, na qual se estabelecem metas para a participação das energias renováveis na matriz elétrica, com o fim de alcançar um objetivo de 20% para o ano 2025. No caso das centrais hidroelétricas, segundo a lei N°26.190, são consideradas fontes renováveis aquelas centrais hidroelétricas com potências de menos de 50 MW. Para conseguir esse objetivo, se definiram benefícios fiscais para os produtores independentes e locais de energia e foi criado um fundo para o desenvolvimento de energias renováveis.

Em dezembro de 2017 se aprovou a lei N°27.424: “*RÉGIMEN DE FOMENTO A LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ENERGÍA RENOVABLE INTEGRADA A LA RED ELÉCTRICA PÚBLICA*”, na qual se estabelecem as políticas e condições jurídicas e contratuais para a geração de energia elétrica de origem renovável pelos usuários da rede de distribuição, para seu autoconsumo e eventual injeção de excedentes na rede. Com a aprovação desta lei, foi criado um fundo fiduciário público chamado “*Fondo para la Generación Distribuida de Energías Renovables*” (FODIS). O objetivo do Fundo é aplicar os ativos fiduciários à concessão de empréstimos, incentivos, garantias, realização de aportes de capital e aquisição de outros instrumentos financeiros, todos eles destinados à implantação de sistemas de geração distribuída a partir de fontes renováveis. Esta lei ainda não foi regulamentada. Ela já foi assinada, mas ainda falta regulamentação sobre questões técnicas e de preços para os usuários conseguirem injetar energia elétrica à rede.

1.1 TEMA

Geração distribuída de energia elétrica obtida a partir de fonte solar fotovoltaica com injeção à rede.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho se limita ao estudo da instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência situada no Município de Tigre da Província de Buenos Aires (Argentina) com injeção à rede de distribuição.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

O preço da energia elétrica na Província de Buenos Aires é baixo devido aos subsídios oferecidos pelo governo, e o setor de energia solar fotovoltaica está começando a se desenvolver, o que faz que os preços dos fornecedores locais sejam altos em comparação com outros países.

Na Argentina, não existem dados detalhados de radiação solar como existem no Atlas Brasileiro de Energia Solar.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Estudar a instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência com injeção à rede de distribuição no Município de Tigre, na Província de Buenos Aires (Argentina), e calcular a diminuição de emissões de CO₂ nessa residência causada pela instalação do sistema.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o consumo anual e custo de energia elétrica da residência em estudo.
- Dimensionar um sistema fotovoltaico para esta residência.
- Avaliar possíveis fornecedores.
- Calcular o investimento necessário, o novo custo da energia elétrica e o tempo de retorno do investimento.
- Calcular a partir de qual preço da energia elétrica o investimento se faz viável.
- Calcular a diminuição das emissões de CO₂ na residência em estudo causada pela instalação do sistema fotovoltaico.

1.5 JUSTIFICATIVA

Este estudo foi escolhido levando em conta que o setor de energia fotovoltaica residencial com injeção à rede ainda não está instalado na Argentina. Com este estudo se pretende dimensionar um sistema fotovoltaico que atinge o consumo total da residência e comparar a conta de energia elétrica com e sem o sistema fotovoltaico. Também se pretende calcular as emissões de CO₂ que seriam diminuídas com essa instalação.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método de pesquisa será de caráter bibliográfico, utilizando bibliografia, artigos e normas; também será feito um estudo de caso em uma residência no Município de Tigre, levantando os dados de consumo energético, dimensionando o sistema fotovoltaico e fazendo uma análise econômica e ambiental do mesmo.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será dividido em quatro capítulos: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia e Discussões e Conclusões.

No presente capítulo se apresenta uma introdução, o tema, os problemas e premissas e os objetivos gerais e específicos do trabalho.

No segundo capítulo é apresentado a revisão bibliográfica, incluindo as normas que regulam o setor de energia solar fotovoltaica residencial na Argentina; os artigos e publicações com respeito à radiação solar, ao efeito fotovoltaico, às instalações de energia solar fotovoltaica com injeção à rede; os dados de irradiação solar e a pesquisa de fornecedores.

No terceiro capítulo será feito um estudo de caso em uma residência, baseado na revisão bibliográfica já mencionada e o levantamento de dados da residência. Com estes dados, se dimensionará um sistema fotovoltaico e se calcularão os custos e o tempo de retorno do investimento. Também se calculará a diminuição das emissões de CO₂ resultantes da instalação do sistema fotovoltaico.

No quarto capítulo, se analisarão os resultados e serão feitas as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

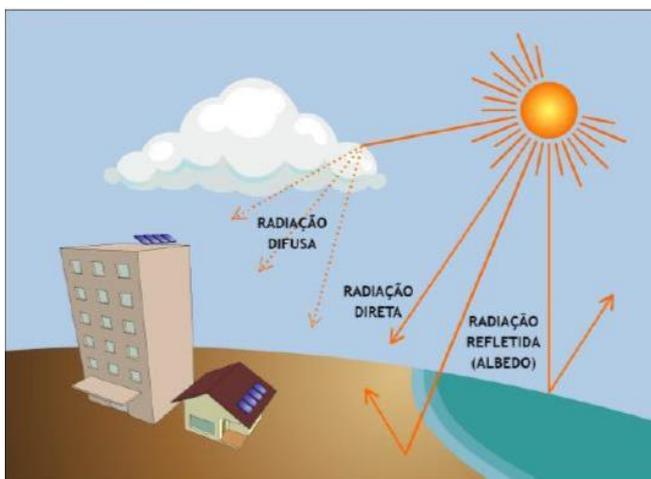
2.1 RADIAÇÃO SOLAR

Muita energia vem do Sol para a Terra. Essa energia fornece calor, forma os ventos, os potenciais hidráulicos dos rios, as correntes marinas e é incorporada aos vegetais através da fotossíntese, servindo assim para sustentar toda a cadeia alimentar do planeta (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

A superfície da Terra recebe, ao longo do ano, uma quantidade de energia solar, em forma de luz e calor, suficiente para suprir milhares de vezes às necessidades energéticas mundiais durante o mesmo período. Este fato indica que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui uma inesgotável fonte energética, com enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia. Um exemplo é a captação da radiação solar pelas células fotovoltaicas, convertendo a energia solar em energia elétrica (VILLALVA et al., 2012).

A Figura 3 mostra os diferentes tipos de radiação que atingem a superfície terrestre. A radiação solar global horizontal é a soma da radiação direta e da difusa. A radiação direta corresponde aos raios de sol que chegam diretamente do sol, sem ação de difusão pela atmosfera. A radiação difusa corresponde aos raios de sol que chegam à superfície terrestre após a mudança de direção, resultado da difusão na atmosfera (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

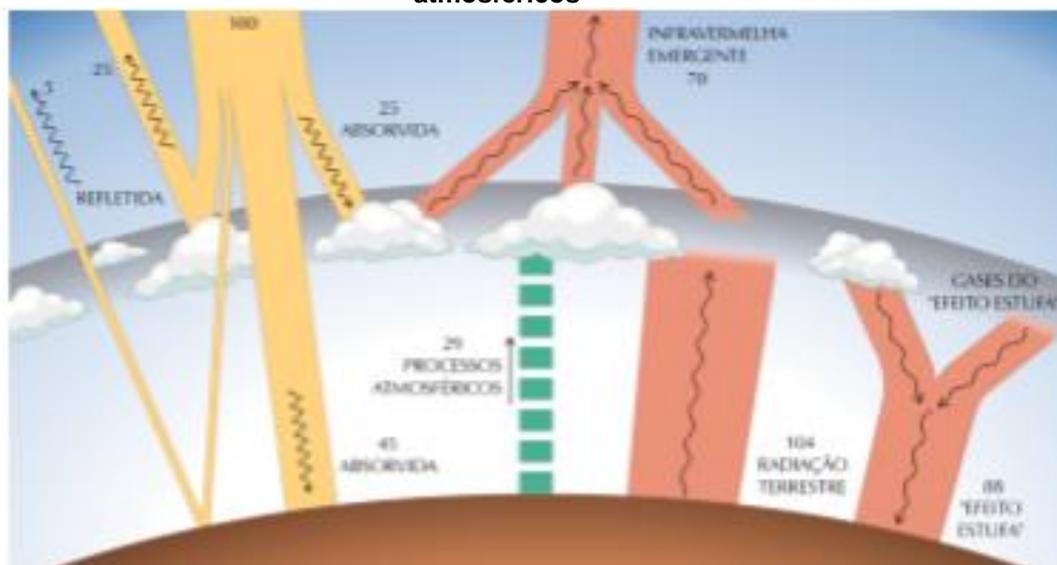
Figura 3 – Componentes da Radiação Solar: difusa, direta e albedo



Fonte: VIANA, 2010

Na Figura 4 se representam os principais processos radiativos que acontecem na atmosfera terrestre. O espalhamento da radiação solar é produzido pelas moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão. A absorção ocorre com moléculas de ozônio (O₃), vapor de água, oxigênio (O₂) e CO₂ (Pereira, et al., 2017).

Figura 4 – Processo de interação da radiação solar com os principais constituintes atmosféricos



Fonte: Pereira et al., 2017

2.1.1 Irradiância

A irradiância é uma grandeza que indica a taxa em que a energia radiante incide em uma superfície por unidade de área, em um determinado momento e em uma determinada condição. Ela é expressa em W/m² (watt por metro quadrado), pois indica a potência por unidade de área. Como a potência expressa a energia transportada durante um período de tempo, quanto maior seja a irradiância, maior a energia transportada (VILLALVA et al., 2012) (DUFFIE e BECKHAM, 2013).

A potência solar por unidade de área radiante na camada acima da atmosfera é de 1.366 W/m² (denominada de constante solar) (ALDABÓ, 2002 apud TONIN, 2017). Os processos físicos (absorção e espalhamento) geralmente atenuam a irradiância solar. A irradiância incidente na superfície da Terra após estes processos atinge seu valor máximo de aproximadamente 1.000 W/m² no meio dia solar (Pereira, et al., 2017). Esta irradiância é utilizada como padrão na indústria fotovoltaica para a especificação e avaliação de células e módulos fotovoltaicos (VILLAVA et al., 2012).

2.1.2 Irradiação

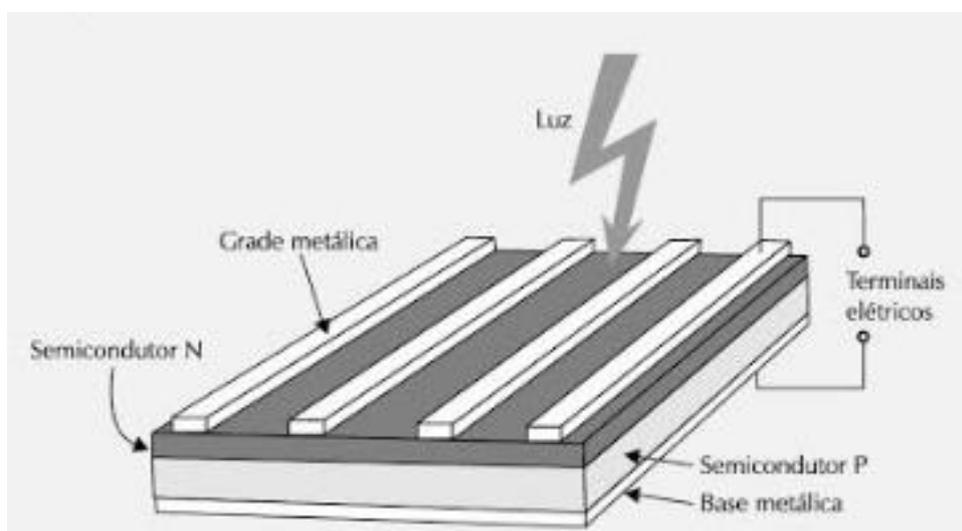
A irradiação é a grandeza usada para mensurar a energia solar incidente por unidade de área em uma superfície (Wh/m^2). Ela é dada pela integração da irradiância em um tempo especificado (DUFFIE e BECKHAM, 2013). Esta medida é útil para fazer dimensionamentos dos sistemas fotovoltaicos, pois fornece o recurso solar disponível em uma região específica (VILLALVA et al, 2012).

2.2 TECNOLOGIAS DOS MODULOS FOTOVOLTAICOS

2.2.1 Células fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é a parte elementar do módulo fotovoltaico. Pelo efeito fotovoltaico, ela converte diretamente a luz do sol em eletricidade. Na Figura 5 se ilustra a estrutura de uma célula fotovoltaica.

Figura 5 – Estrutura de uma célula fotovoltaica



Fonte: VILLALVA et al., 2012

Ela é composta pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma camada de material tipo P e outra de material tipo N. O material N possui um excedente de elétrons e o material P tem falta de elétrons. Quando os dois materiais entram em contato, se forma uma junção semicondutora, onde os elétrons da camada N migram para a camada P, ocupando os espaços vazios e gerando assim um campo elétrico que cria uma barreira de potencial. Quando os raios solares chegam à célula fotovoltaica, eles penetram no material N, descarregando sua energia sobre os

elétrons, fazendo a eles ter suficiente energia para vencer a barreira de potencial e se movimentar da camada N à camada P. Se houver um circuito fechado, os elétrons vão circular, formando assim uma corrente elétrica (VILLALVA et al., 2012).

2.2.2 Tipos de células fotovoltaicas

Os materiais semicondutores mais comumente encontrados na constituição de células fotovoltaicas são: Silício (Si); telúrio (Te); cádmio (Cd); cobre (Cu); índio (I); gálio (Ga); selênio (Se), entre outros (RUTHER, 2004b; 2006 apud URBANETZ JUNIOR, 2010).

As tecnologias mais frequentemente encontradas no mercado são de Si, podendo ser Silício monocristalino (m-Si) ou policristalino (p-Si), e filmes finos (VILLALVA et al., 2012).

O Silício é um material que pode ser extraído do mineral quartzo. Este mineral deve passar por um processo de purificação para conseguir o Silício ultrapuro, que é utilizado para a construção das células fotovoltaicas (VILLALVA et al., 2012).

2.2.3 Módulos de p-Si.

O p-Si é a tecnologia mais usada para a fabricação de módulos fotovoltaicos. No ano 2016, 94% da produção mundial de módulos fotovoltaicos foram de Si, sendo 70% de p-Si (*Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, 2018).

Para a fabricação das células de p-Si, primeiro se forma um lingote de p-Si. Este é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes. O lingote é serrado para produzir *wafers*. Os *wafers* não possuem as propriedades de uma célula fotovoltaica. Para conseguir estas propriedades, os *wafers* são submetidos a processos químicos, recebendo impurezas em ambas faces, formando assim as camadas P e N, adquirindo as propriedades para o funcionamento da célula fotovoltaica. Por último, recebe uma película metálica em uma das faces e uma camada de material antireflexivo na face que vai se expor ao sol, formando assim a célula fotovoltaica. As células de p-Si possuem aparência heterogênea. Elas têm eficiências comerciais entre 13% e 15%. São células rígidas e quebradiças, que precisam ser montadas em módulos para adquirir resistência mecânica (VILLALVA et al., 2012). Na Figura 6 mostra-se uma célula fotovoltaica de p-Si.

Figura 6 – Células fotovoltaicas de p-Si



Fonte: Bosch Solar Energy AG apud VILLALVA et al., 2012

Uma célula produz pouca eletricidade, então várias células são agrupadas para produzir os módulos fotovoltaicos. O módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células conectadas eletricamente e montadas sobre uma estrutura rígida. Normalmente, as células são conectadas em série para produzir tensões maiores (VILLALVA et al., 2012).

Para gerar a energia requerida, os módulos são associados (formando um painel fotovoltaico) em arranjos série/paralelo a fim de obter o nível de tensão e corrente desejados (URBANETZ JUNIOR, 2010).

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (SFCR)

O objetivo dos SFCRs é gerar eletricidade para o consumo local, reduzindo assim o consumo da rede pública ou até gerando excedente de energia elétrica para injetar à rede (VILLALVA et al., 2012). Os SFCRs são constituídos basicamente por: painel fotovoltaico e inversor. Na Figura 7 mostra-se um esquema básico de um SFCR.

Figura 7 – Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica

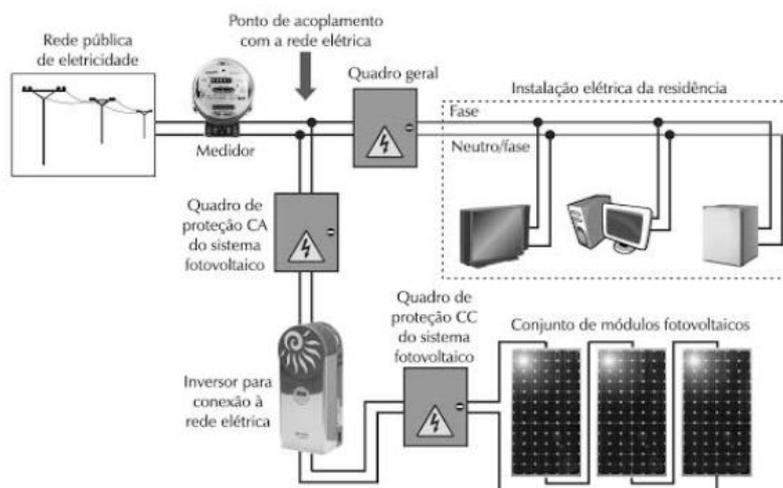


Figura 5.9: Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica. Cortesia: Eudora Solar.

Fonte: Eudora Solar apud VILLALVA et al., 2012

Os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua. Essa energia vai para o inversor que converte a corrente contínua em corrente alternada, para poder consumir no local ou para injetar na rede. Logo do inversor, a energia vai para o local e o excedente vai para o medidor bidirecional. O medidor vai contabilizar tanto a energia que é consumida da rede quanto a que é injetada na rede.

As principais vantagens desse tipo de sistema são: a elevada produtividade (toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada) e a ausência do conjunto de baterias (URBANETZ JUNIOR, 2010).

Com esta configuração, se o painel for dimensionado para cobrir o consumo total de energia elétrica do local, o painel solar vai gerar toda a energia que o local consume durante as horas de sol e ainda mais energia que vai ser injetada na rede. Durante as horas onde não há luz solar, o local vai consumir a energia da rede elétrica uma quantidade equivalente à energia que foi injetada na rede.

2.4 RADIAÇÃO SOLAR NO MUNICÍPIO DE TIGRE, NA ARGENTINA

Na Argentina, não existe um Atlas de Energia Solar, como o que existe no Brasil. A radiação solar é obtida do *Global Solar Atlas*, cujo endereço eletrônico é: globalsolaratlas.info.

Neste atlas existem dados entre as latitudes 60°N e 45°S. O Atlas fornece dados de radiação global, difusa e direta médios anuais de longo prazo.

Para as aplicações de energia solar fotovoltaica são necessárias:

- Irradiação global horizontal (G_{HI}), kWh/m²: soma da irradiação direta e difusa que os módulos receberiam se estivessem horizontais.
- Irradiação global inclinada (G_{TI}), kWh/m²: soma da irradiação direta, difusa e albedo que os módulos receberiam estando com o ângulo ótimo.
- Saída de energia (PV_{OUT}), kWh/kWp: produtividade, quantidade de energia esperada convertida por um sistema fotovoltaico, de acordo com as condições geográficas, a localização e a configuração do painel fotovoltaico. Para isso são consideradas três possíveis configurações, a seguir: pequena residencial, tamanho médio comercial e grande escala.
- Ângulo ótimo (OPTA), graus: ângulo ótimo de inclinação de um painel fotovoltaico fixo para uma determinada localização, no qual os módulos vão receber a maior irradiação solar ao longo do ano.

Para conseguir todos esses dados, o usuário deve inserir: localização, potência do sistema a instalar (a soma das potências dos módulos fotovoltaicos), orientação dos módulos e inclinação dos módulos.

2.5 COMPARAÇÃO DOS DADOS DOS DOIS ATLAS SOLARES

Para fazer uma comparação dos dados fornecidos pelos diferentes atlas, se procuraram os dados de irradiação tanto no *Global Solar Atlas* quanto no Atlas Brasileiro de Energia Solar, para um mesmo local, na cidade de Curitiba. O local escolhido foi no Parque Barigui.

O primeiro passo foi procurar as coordenadas do local no *Google Earth*, elas são mostradas na Figura 8.

Figura 8 – Local escolhido para comparar os dados de irradiação dos diferentes atlas



Fonte: Google Earth Pro

As coordenadas do local, no Parque Bargui, são: -25,43°; -49,31°.

Ingressando estas coordenadas no Atlas Brasileiro de Energia Solar, o ponto mais próximo corresponde as coordenadas -25,4°; -49,35°. A Tabela 1 mostra os dados de irradiação horizontal fornecidos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar perto do local escolhido.

Tabela 1 – G_{HI} fornecido pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar

LONGITUDE (°)	LATITUDE (°)	G_{HI} ANUAL (Wh/m^2 dia)
-49,349	-25,5005	4195
-49,249	-25,5005	4201
-49,349	-25,4005	4214
-49,249	-25,4005	4194

Segundo o Atlas Brasileiro, tomando como base as coordenadas ressaltadas (-25,4°; -49,35°):

- G_{HI} : 4.214 Wh/m^2 dia, o que seria equivalente a:

$$4214 \frac{Wh}{m^2 \cdot dia} \cdot \frac{1kWh}{1000Wh} \cdot \frac{365 dias}{1 ano} = 1538,1 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$$

A Tabela 2 mostra os dados de irradiação inclinada fornecida pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar nas coordenadas escolhidas.

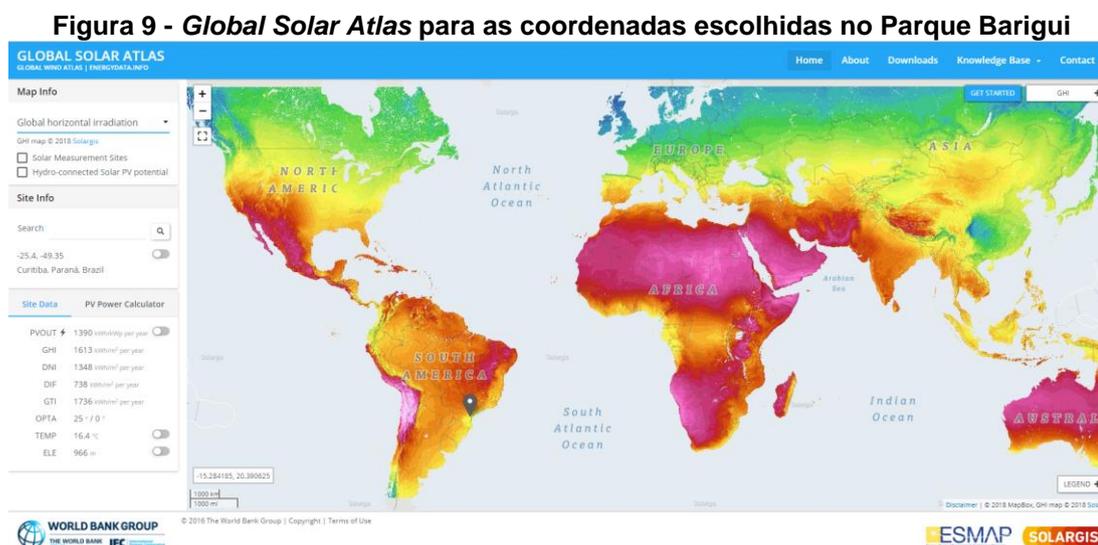
Tabela 2 - G_{TI} fornecido pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar

LONGITUDE (°)	LATITUDE (°)	G_{HI} ANUAL (Wh/m ² dia)
-49,349	-25,4005	4431

• G_{TI} : 4.431 Wh/m² dia, o que seria equivalente a:

$$4431 \frac{Wh}{m^2 \cdot dia} \cdot \frac{1kWh}{1000Wh} \cdot \frac{365 dias}{1 ano} = 1617,3 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$$

Para o *Global Solar Atlas*, se escolheram as coordenadas coincidentes com as do Atlas Brasileiro de Energia Solar, estas são: -25,4°, -49,35°. Na Figura 9 mostram-se os dados de irradiação horizontal e inclinada fornecidas pelo *Global Solar Atlas*.



Fonte: *Global Solar Atlas*

Segundo o *Global Solar Atlas*, nessas coordenadas a irradiação é:

G_{HI} : 1.613 kWh/m² ano

G_{TI} : 1.736 kWh/m² ano

OPTA: 25°

Comparando os valores, para a irradiação no plano horizontal, o *Global Solar Atlas* fornece um valor 5% maior ao do Atlas Brasileiro de Energia Solar. No caso da irradiação no plano inclinado, o *Global Solar Atlas* fornece um valor 7% maior ao do Atlas Brasileiro de Energia Solar.

2.6 FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS NA ARGENTINA

Na Argentina existem 3 empresas que produzem seus próprios módulos fotovoltaicos. Estas três empresas, além de fabricar e comercializar os módulos fotovoltaicos, comercializam inversores e suportes para os módulos.

A empresa LV-Energy está localizada na Província de San Luis. Ela produz módulos de 60 células com potências que vão desde os 270 Wp até 280 Wp e módulos de 72 células com potências que vão desde 320 Wp até 340 Wp. Todos eles com tecnologia de p-Si.

A fábrica da FIASA está localizada no interior da Província de Buenos Aries. Ela produz módulos fotovoltaicos que vão desde os 3 Wp até os 315 Wp com tecnologia de p-Si.

A fábrica da SOLARTEC está localizada na Província de La Rioja. Ela produz módulos tanto com tecnologia de p-Si quanto de m-Si, com potências que vão desde os 3 Wp até 340 Wp.

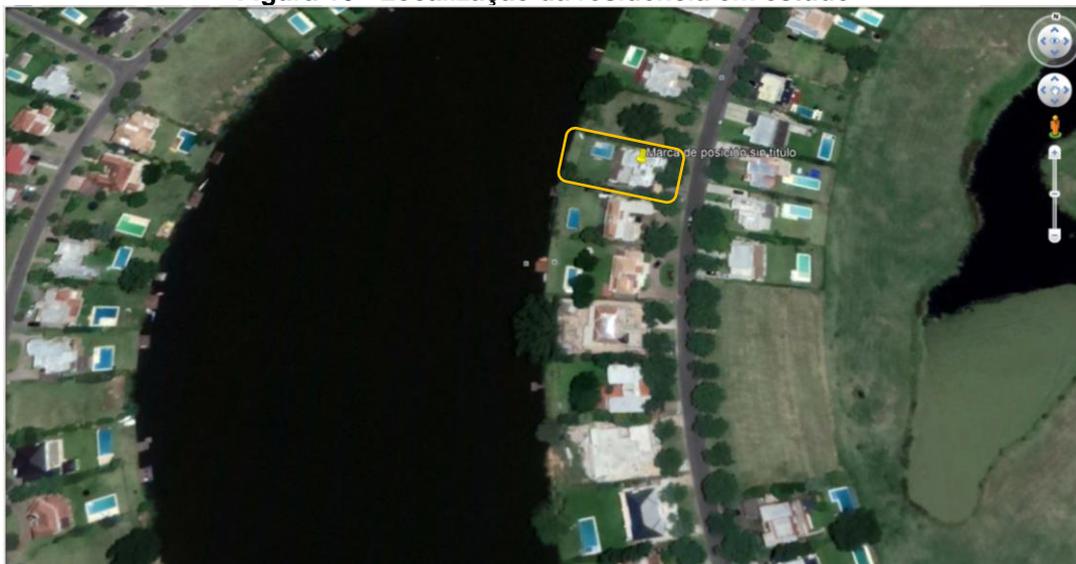
Além destas empresas que fabricam seus próprios módulos fotovoltaicos, existem outras que comercializam módulos, inversores e suportes.

3 METODOLOGIA

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA RESIDÊNCIA

A residência encontra-se na localidade de Dique Luján, Municipio de Tigre, Província de Buenos Aires. As coordenadas tomadas do *Google Earth* no teto da residência são: $-34,38^\circ$; $-58,68^\circ$. Na Figura 10 mostra-se a localização da residência em estudo.

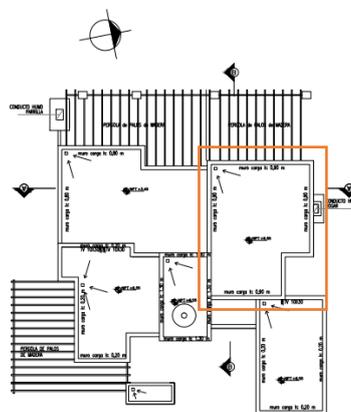
Figura 10 - Localização da residência em estudo



Fonte: Google Earth

Esta residência possui cobertura com lage no plano horizontal, o que faz que seja mais fácil dar aos módulos a orientação e inclinação ótimas. A Figura 11 mostra a planta dos tetos da residência em estudo.

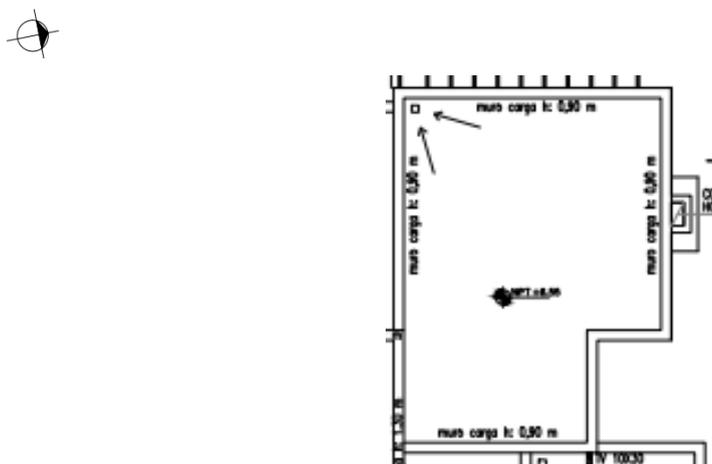
Figura 11 - Planta de tetos da residência em estudo



PLANTA DE TECHOS

Dada a configuração dos tetos da residência, e sendo que eles são quase horizontais, os módulos poderiam ser instalados com a inclinação ótima e com orientação norte. A parte da laje escolhida para fazer a instalação do painel fotovoltaico é a que está marcada, pois é a que tem maior área, dentro das de maior altura. Na Figura 12 segue um detalhe da laje.

Figura 12- Detalhe da laje onde será instalado o painel solar fotovoltaico



Foram levantados os dados de consumo energético da residência do último ano. Desde a segunda quinzena de abril de 2017 até a primeira quinzena de abril de 2018, na residência foram consumidos um total de 7.882 kWh, com maiores consumos durante os meses mais quentes, devido ao uso de ar condicionado. A Tabela 3 contém os dados de consumo de energia elétrica na residência por um ano.

Tabela 3 – Consumo de energia elétrica na residência em estudo

Período	Consumo (kWh)	Consumo mensal (kWh)
12/04/17-13/06/17	1081	540
		541
13/06/17-10/08/17	908	454
		454
10/08/17-11/10/17	1036	518
		518
11/10/17-13/12/17	1001	493
		508
13/12/17-14/02/18	2229	1097
		1132
14/02/18-12/04/18	1627	799
		828
Anual	7882	7882

3.2 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

3.2.1 Dimensionamento pelo *Global Solar Atlas*

3.2.1.1 Dados fornecidos pelo *Global Solar Atlas*

Inserindo as coordenadas da residência, o *Global Solar Atlas* fornece os seguintes resultados mostrados na Figura 13.

Ângulo ótimo: 30°

G_{TI} : 1.979 kWh/m² ano

G_{HI} : 1.756 kWh/m² ano

PV_{OUT} : 1.562 kWh/kWp ano

Figura 13 - Resultado do *Global Solar Atlas* para as coordenadas da residência em estudo.



Fonte: *Global Solar Atlas*.

$$Potência = \frac{Energia\ gerada}{Produtividade}$$

Equação 1 – Potência do sistema fotovoltaico

Visto que é necessário gerar 7.882 kWh/ano de energia e que a produtividade na região é de 1.562 kWh/kWp ano, chega-se a que a potência do sistema fotovoltaico a instalar, segundo a equação 1, deveria ser de 5,05 kWp.

$$P_{FV} = \frac{7882 \frac{kWh}{ano}}{1562 \frac{kWh}{kWp.ano}} = 5,046 \text{ kWp}$$

3.2.1.2 *Performance Ratio* utilizado pelo *Global Solar Atlas*

Para calcular o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, se utiliza a equação 2:

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{G_{TI} \cdot PR}$$

Equação 2 - Cálculo da potência do sistema fotovoltaico

Onde:

P_{FV} - Potência fotovoltaica (kWp)

E - Energia gerada anualmente (kWh/ano)

G_{TI} - Irradiação solar incidente no plano dos módulos FV (kWh/m² ano)

PR – *Performance Ratio*

G – Irradiância nas condições STC (1 kW/m²)

Dado que, com o dado de produtividade fornecido pelo *Global Solar Atlas*, já foi calculada a potência, é possível calcular o PR que o *Global Solar Atlas* utiliza.

$$PR = \frac{E \cdot G}{G_{TI} \cdot P_{FV}}$$

Equação 3 – Cálculo do *Performance Ratio* utilizado pelo *Global Solar Atlas*

Inserindo os dados fornecidos pelo *Global Solar Atlas*, para um ângulo de 30°:

E: 7.882 kWh/ano

G: 1 kWh/m²

G_{TI} : 1.979 kWh/m² ano

P_{FV} : 5,05 kWp

$$PR = \frac{7882 \frac{kWh}{ano} \cdot 1 \frac{kWh}{m^2}}{1979 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano} \cdot 5,05 kW} = 0,7893$$

O *Performance Ratio* utilizado pelo *Global Solar Atlas* é de 0,79.

3.2.1.3 Ângulo ótimo calculado pelo *Global Solar Atlas*

Segundo a literatura internacional, o ângulo ótimo de inclinação para um sistema fotovoltaico conectado à rede deveria ser o ângulo da latitude do local de instalação (neste caso, 34°), porém o *Global Solar Atlas* fornece como ângulo ótimo 30 ou 31°.

Para confirmar os resultados fornecidos, e tomando como base um sistema fotovoltaico com uma potência de 1 kWp, se inseriram no *Global Solar Atlas*, diferentes ângulos de inclinação dos módulos, e ele deu como resultado a energia gerada com cada um desses ângulos. A Tabela 4 mostra os resultados fornecidos pelo *Global Solar Atlas*, onde a maior energia gerada se dá com ângulos que vão de 29° até 32°:

Tabela 4 – Resultado do *Global Solar Atlas* da energia gerada por um painel de 1kWp com diferentes ângulos de inclinação, no local de estudo.

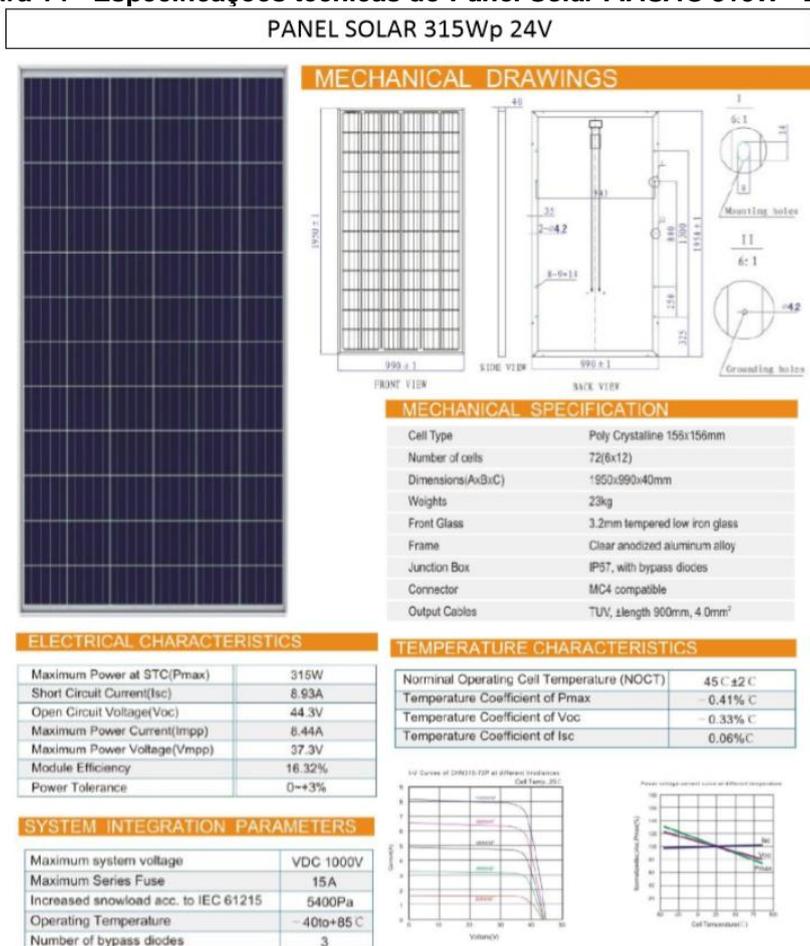
Inclinação	G _{TI} (kWh/m ² ano)	Energia Gerada
		(kWh/ano)
28°	1974	1478
29°	1975	1479
30°	1975	1479
31°	1974	1479
32°	1974	1479
33°	1972	1478
34°	1970	1477

3.3 ESCOLHA DOS MÓDULOS E DOS INVERSORES

3.3.1 Escolha dos módulos

O módulo escolhido foi o *Panel Solar FIASA® 315W - 24 V*. As especificações do mesmo estão na Figura 14.

Figura 14 - Especificações técnicas do **Panel Solar FIASA® 315W - 24 V**.



Fonte: FIASA Argentina, 2018

Segundo os dados das especificações técnicas, cada painel tem:

Potência máxima: 315 Wp

Tensão de circuito aberto (V_{OC}): 44,3 V

Tensão de máxima potência (V_{MPP}): 37,3 V

Corrente de máxima potência (I_{MPP}): 8,44 A

Para calcular a quantidade de módulos necessários, se divide a potência do painel com a potência dos módulos, dando como resultado que serão necessários 16 módulos fotovoltaicos.

$$\text{Número de módulos} = \frac{5046 \text{ Wp}}{315 \text{ Wp}} = 16,019$$

O arranjo dos módulos, será de 16 em série. Deste modo, os dados totais do painel serão:

POTÊNCIA: $315W \cdot 16 = 5.040W$

CORRENTE DE MÁXIMA POTÊNCIA: $8,44A \cdot 1 = 8,44A$

TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO: $44,3V \cdot 16 = 708,8V$

TENSÃO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA: $37,3V \cdot 16 = 596,8V$

3.3.2 Escolha do inversor

O inversor escolhido foi o inversor *On Grid FRONIUS PRIMO 6.0-1 208-240*. As especificações de entrada do mesmo estão na Figura 15.

Figura 15 – Especificações técnicas do inversor *On Grid FRONIUS PRIMO 6.0-1 208-240*.

INPUT DATA	
Number of MPPT	2,0
Recommended PV Power (kWp)	4,8 - 9,3 kWp
Max. usable input current	18,0 / 18,0 A
Max. usable input current total (MPPT1 + MPPT2)	36,0 A
Max. array short circuit current ($1.5 \cdot I_{max}$)	27 / 27 A
Nominal input voltage	420,0 V
Operating voltage range	80 - 1000 V
DC startup voltage	80,0 V
MPP Voltage Range	240 - 800 V
Max. input voltage	1000 V
Admissible conductor size (DC)	AWG 14 - AWG 6
Admissible conductor size (AC)	AWG 14 - AWG 6

Fonte: FRONIUS, 2018

3.3.3 Escolha do suporte

O suporte escolhido, mostrado na Figura 16, foi o “*Soporte para Panel Solar FIASA® para Techo Tipo Reticulado 220.900.110*”, que suporta até 4 módulos de 300/335 W. Este é um suporte feito para instalar nos tetos horizontais, com inclinação regulável entre 30° e 40°. Serão necessários 4 suportes para os 16 módulos do painel.

Figura 16 – Suporte para os módulos.



Fonte: FIASA Argentina, 2018

3.4 ANÁLISE ECONÔMICA

3.4.1 Custos dos equipamentos

Na Tabela 5 são mostrados os custos em pesos argentinos dos equipamentos:

Tabela 5 – Custos dos equipamentos

	Custo individual (\$ARG)	Quantidade	Custo total (\$ARG)
Módulos fotovoltaicos	9.865,00	16	157.840,00
Suportes para módulos	10.066,00	4	40.264,00
Inversor	133.500,00	1	133.500,00
Total			331.604,00

Para a análise econômica foram considerados apenas os equipamentos mais caros. Não foram incluídos os custos de cabos, mão de obra e quadros de proteção.

3.4.2 Energia gerada pelo painel

Sendo que o painel a instalar não vai ter exatamente a potência calculada pelo *Global Solar Atlas*, para fazer a análise econômica, vai se calcular a energia gerada, utilizando a potência do painel, o G_{TI} fornecido pelo *Global Solar Atlas* e o PR calculado no item 3.2.1.2.

$$E = \frac{P_{FV} \cdot G_{TI} \cdot PR}{G}$$

Equação 4 – Energia gerada

No caso de estudo os dados são:

P_{FV} : 5,040 kW

G_{TI} : 1.979 kWh/m² ano

PR: 0,7893

G: 1 kWh/m²

$$E = \frac{5,04kWh \cdot 1979 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano} \cdot 0,7893}{1 \frac{kWh}{m^2}} = 7872,48 \frac{kWh}{ano}$$

O painel dimensionado, vai gerar 7.872,5 kWh/ano.

3.4.3 Energia gerada mensalmente pelo painel

Sendo que o consumo no local tem uma grande variação entre os meses frios e os meses quentes, é necessário fazer um cálculo da geração mensal de energia do sistema fotovoltaico.

Tomando como base os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, no sítio mais austral do Brasil (longitude 53,549°, latitude 33,7005°), os dados de irradiação inclinada são os mostrados na Tabela 6 (Wh/m² dia):

Tabela 6 – Dados de irradiação inclinada média diária no sítio mais austral do Brasil
Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
5773	5560	5572	4666	3667	3348	3410	3927	4357	5212	5816	5962	4772

Os dados mensais serão então os mostrados na Tabela 7 (kWh/m² mês):

Tabela 7 – Dados de irradiação inclinada média mensal no sítio mais austral do Brasil

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
												kWh/m ² ano
179	155,7	172,7	140	113,7	100,4	105,7	121,7	130,7	161,5	174,5	184,8	1741,78

Supondo que no sítio em estudo as variações mensais são similares, a irradiação inclinada mensal (kWh/m² mês) ficaria segundo os valores da Tabela 8:

Tabela 8 – Dados calculados de irradiação mensal na residência em estudo

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
												kWh/m ² ano
203,3	176,9	196,3	159	129,2	114,1	120,1	138,3	148,5	183,6	198,2	210	1979

Utilizando a equação 4, com os dados de irradiação mensais mostrados na tabela 9, a potência do painel e a PR calculado no ítem 3.2.1.2., se calcula a energia gerada mensalmente (kWh/mês). Os dados calculados mostram-se na Tabela 9:

Tabela 9 – Energia gerada mensalmente pelos painéis fotovoltaicos na residência em estudo.

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
808,9	703,6	780,7	632,7	513,8	454	477,8	550,2	590,8	730,3	788,6	835,4

3.4.4 Custo da energia

Das notas fiscais da concessionária de energia, se pode enxergar que o preço total inclui uma taxa fixa que vai variar de acordo com o faixa do consumo do local, uma taxa variável que é o preço do kWh, e os impostos feitos tanto sobre a taxa fixa quanto sobre a taxa variável, os quais, dependendo do mês, vão de 33,57 até 43,57% da taxa fixa mais variável.

Sendo que a lei ainda não foi regulamentada, mas fala de compensação de energia, é possível supor que toda a energia gerada pode se compensar ao mesmo preço da energia comprada.

Na Tabela 10 se detalham os dados de consumos e preços do período de segunda quinzena de abril de 2017 até a primeira quinzena de abril de 2018:

Tabela 10 – Dados de consumo e preços na residência em estudo

Período	Consumo mensal (kWh)	Taxa fixa (\$ARG)	\$/kWh (\$ARG)	Taxa variável (\$ARG)	Impostos 43,5664%- 33,5664% (\$ARG)	Taxa municipal (\$ARG)	Total (\$ARG)
12/04/17-	540	201,65	1,073	579,42	340,29	35,57	1156,93
13/06/17	541	201,65		580,49	340,75	35,57	1158,47
13/06/17-	454	94,32	1,04	472,16	211,39	33,28	729,89
10/08/17	454	94,32		472,16	211,39	33,28	729,89
10/08/17-	518	201,65	1,073	555,81	330	35,57	1123,04
11/10/17	518	201,65		555,81	330	35,57	1123,04
11/10/17-	493	100,83	1,04	512,72	267,30	35,57	916,42
13/12/17	508	120,65		614,63	320,34	36,72	1092,34
13/12/17-	1097	946,57	1,572	1724,48	1163,68	35,57	3870,3
14/02/18	1132	1061,88	1,968- 1,572	1975,62	1323,33	36,72	4397,55
14/02/18-	799	1024,52	1,968	1572,43	1131,40	41,31	3769,65
12/04/18	828	1061,11		1629,50	755,16	42,79	3488,56
Anual	7882	5310,79		11245,25	6725,02	437,52	23556,06

No Quadro 2 mostra-se o quadro tarifário vigente desde o 01/08/2018 segundo a resolução ENRE N° 208/2018.

Quadro 2 - Quadro de tarifas vigente

Tarifa 1 (Pequenas demandas)			Valor (\$ARG)
Tarifa	Conceito	Unidade	
T1-R	Uso residencial		
R1	Consumo mensal inferior ou igual a 150 kWh		
	Taxa fixa (existe ou não consumo)	\$/mês	30,69
	Taxa variável	\$/kWh	1,962
R2	Consumo mensal de 151 kWh até 325 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	54,66
	Taxa variável	\$/kWh	1,959
R3	Consumo mensal de 326 kWh até 400 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	91,34
	Taxa variável	\$/kWh	2,013
R4	Consumo mensal de 401 kWh até 450 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	107,48
	Taxa variável	\$/kWh	2,093
R5	Consumo mensal de 451 kWh até 500 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	163,44
	Taxa variável	\$/kWh	2,173
R6	Consumo mensal de 501 kWh até 600 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	321,94
	Taxa variável	\$/kWh	2,227
R7	Consumo mensal de 601 kWh até 700 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	839,18
	Taxa variável	\$/kWh	2,370
R8	Consumo mensal de 701 kWh até 1400 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	1,204,43
	Taxa variável	\$/kWh	2,478
R9	Consumo mensal maior a 1400 kWh		
	Taxa fixa	\$/mês	1,450,28
	Taxa variável	\$/kWh	2,504

FONTE: EDENOR S.A., 2018

Tendo a conta as tarifas vigentes, e supondo que o consumo vai se manter constante nos próximos anos, os preços sem instalar o painel solar seriam os mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Preços calculados para um período de um ano segundo o quadro tarifário vigente.

Período	Consumo (kWh)	Consumo mensal (kWh)	Taxa fixa (\$ARG)	Taxa variável (\$ARG)	Impostos 33,5664% (\$ARG)	Taxa municipal (\$ARG)	Total (\$ARG)
12/04-13/06	1081	540	321,94	1202,58	511,73	35,57	2071,82
		541	321,94	1204,81	512,47	35,57	2074,79
13/06-10/08	908	454	163,44	986,54	386,01	33,28	1569,27
		454	163,44	986,54	386,01	33,28	1569,27
10/08-11/10	1036	518	321,94	1153,59	495,28	35,57	2006,38
		518	321,94	1153,59	495,28	35,57	2006,38
11/10-13/12	1001	493	163,44	1071,29	414,45	35,57	1684,75
		508	321,94	1131,21	487,81	36,72	1977,78
13/12-14/02	2229	1097	1204,43	2718,38	1316,74	35,57	5275,11
		1132	1204,43	2805,10	1345,85	36,72	5392,10
14/02-12/04	1627	799	1204,43	1979,92	1068,87	41,31	4294,53
		828	1204,43	2051,78	1092,99	42,79	4392,00
Anual	7882	7882	6917,74	18445,42	8513,50	437,52	34314,17

3.4.5 Custo da energia com a instalação do painel solar

Sendo que os períodos na faturação estão divididos em metades de mês, se fez um cálculo da irradiação nos mesmos períodos e da geração de energia, para assim conseguir comparar com as faturas, os dados figuram na Tabela 12:

Tabela 12 – Irradiação e geração de energia na residência em estudo

	JAN- FEV	FEB- MAR	MAR- ABR	ABR- MAI	MAI- JUN	JUN- JUL	JUL- AGO	AGO- SET	SET- OUT	OUT- NOV	NOV- DEZ	DEZ- JAN
Irradiação (kWh/m ² .mês)	190,1	186,6	177,7	144,1	121,6	117,1	129,2	143,4	166	190,9	204,1	206,7
Energia gerada (kWh/mês)	756,3	752,2	706,7	573,2	483,9	465,9	514	570,5	660,5	759,4	812	822,1

Com a instalação do painel solar em estudo, a residência vai cair em uma nova faixa de consumo. Sem a instalação dos painéis ela está nas tarifas R4 até R8. Com a instalação, vai cair para as tarifas R1 até R3. Tendo a conta que a lei prevê que se num período a geração de energia é maior ao consumo, vai se constituir um crédito para o próximo período, e supondo que a taxa fixa vai ser tomada segundo o consumo líquido da residência antes de crédito, o preço final anual ficaria segundo a Tabela 13:

Tabela 13 – Custo da energia com instalação do painel solar.

Período	Consumo mensal (kWh)	Geração de energia (kWh)	Consumo líquido antes do crédito (kWh)	Crédito (kWh)	Consumo líquido (kWh)	Taxa fixa (\$ARG)	Taxa variável (\$ARG)	Impostos (\$ARG)	Taxa municipal (\$ARG)	Total (\$ARG)
12/04-	540	573	-33		0	30,69	0,00	10,30	35,57	76,56
13/06	541	484	57	33	24	30,69	112,05	47,91	35,57	226,22
13/06-	454	466	-12	0	0	30,69	0,00	10,30	33,28	74,27
10/08	454	514	-60	12	0	30,69	0,00	10,30	33,28	74,27
10/08-	518	571	-53	72	0	30,69	0,00	10,30	35,57	76,56
11/10	518	661	-143	124	0	30,69	0,00	10,30	35,57	76,56
11/10-	493	759	-266	267	0	30,69	0,00	10,30	35,57	76,56
13/12	508	812	-304	533	0	30,69	0,00	10,30	36,72	77,71
13/12-	1097	822	275	837	0	54,66	538,47	199,09	35,57	827,80
14/02	1132	756	376	563	0	91,34	756,34	284,54	36,72	1168,94
14/02-	799	742	57	187	0	30,69	111,46	47,72	41,31	231,18
12/04	828	707	121	130	0	30,69	237,98	90,18	42,79	401,64
Anual	7882	7867				452,90	1756,31	741,55	437,52	3388,28

3.4.6 Cálculo do retorno do investimento

Segue a Tabela 14, com os dados de investimento e economia na conta de energia para o cálculo do retorno do investimento.

Tabela 14 – Cálculo de retorno do investimento

Investimento inicial (\$ARG)	331.604,00
Economia anual na conta de energia (\$ARG)	30.925,90
Tempo de retorno	10,72 anos

Para fazer a análise econômica, se utilizaram os dados de investimento inicial (o custo dos equipamentos), e a economia anual na conta de energia. Esta economia foi calculada tomando como base as tarifas atuais de energia elétrica e o consumo na residência em estudo durante um período de um ano. Com os dados de consumo e as tarifas de energia elétrica foi calculado a preço a pagar sem a instalação dos painéis fotovoltaicos. Com os dados calculados de energia gerada pelo painel, foi calculado o consumo líquido mensal da residência. Com estes dados, o custo da energia elétrica é menor pois a residência cai numa faixa de consumo menor, onde o preço do kWh é mais baixo, a taxa fixa é mais baixa, e o consumo é também menor. A diferença entre os dois preços vai ser a economia anual na conta de energia.

O tempo de retorno resulta em dividir o investimento inicial pela economia anual na conta de energia. Neste trabalho, todos os custos foram tomados com o valor atual do dinheiro, desconsiderando os atuais índices de inflação do país.

Esta primeira análise do *payback* simples, dá um estimativo do tempo de retorno do investimento, porém uma análise mais detalhada deu um tempo de retorno similar. Para a análise mais detalhada foram procurados os valores de inflação desde o ano 2010 até o ano 2017 e os dados de ajustes de preços nas tarifas de energia elétrica no mesmo período, dando como resultado uma média de inflação de 19,61% anual e uma média de aumento de tarifas de 48% anual. Tomando os dados de investimento e economia na conta de energia iniciais, os mesmos foram corrigidos ano a ano com os valores procurados, até que os dois valores deram iguais. Com esta análise, o tempo de retorno do investimento deu em torno a 11 anos.

3.4.7 Cálculo dos custos necessários para conseguir um retorno de investimento menor.

Supondo que os preços dos equipamentos não sofram variações muito importantes, é possível calcular a partir de qual preço de energia elétrica é conveniente instalar painéis fotovoltaicos com injeção à rede.

Se se pretende ter um tempo de retorno de investimento de 7 anos, então a economia na conta de energia anual deveria ser de 47.372 \$ARG/ano.

$$\text{Economia anual na conta de energia} = \frac{\text{Investimento inicial (\$ARG)}}{\text{Tempo de retorno do investimento (anos)}}$$

Equação 5 – Economia na conta de energia com análise de *payback* simples

$$\text{Economia anual na conta de energia} = \frac{331.604 \text{ \$ARG}}{7 \text{ anos}} = 47.372 \frac{\text{\$ARG}}{\text{ano}}$$

Para conseguir ter uma diferença de 47.372 \$ARG/ano entre o preço da energia sem a instalação de painéis fotovoltaicos e com a instalação dos mesmos, e supondo que a taxa fixa vai se manter e o consumo também, o custo da taxa variável anual deveria ser de 31.000 \$ARG, como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 – Valor da energia que viabiliza a instalação de um SFCR

	Taxa fixa (\$ARG)	Taxa variável (\$ARG)	Impostos (\$ARG)	Taxa municipal (\$ARG)	Total
Sem instalação dos painéis com taxa variável atual	6.917,74	18.445,42	8.513,50	437,52	34.314,17
Com instalação dos painéis	452,90	1756,31	741,55	437,52	3388,28
Sem instalação dos painéis com outra taxa variável	6.917,74	31.000	12.727,23	437,52	51.082,88

Este custo de taxa variável de 31.000 \$ARG, corresponderia a um preço da energia elétrica de 3,93 \$ARG/kWh, o que é aproximadamente um 58% maior à maior tarifa que se paga com o quadro tarifário vigente.

$$\text{Preço da energia} \left(\frac{\$ARG}{kWh} \right) = \frac{31.000 \$ARG}{7882 kWh} = 3,93 \frac{\$ARG}{kWh}$$

3.5 ANÁLISE AMBIENTAL

3.5.1 Fator de emissão de CO₂ na rede elétrica argentina

Os dados de fator de emissão de CO₂ na rede elétrica argentina, segundo o *Ministerio de Energia y Minería* seguem na Tabela 16:

Tabela 16 – Fator de emissão de CO₂ na rede elétrica argentina.

Ano	Fator de emissão de CO ₂ (t CO ₂ /MWh)
2012	0,534
2013	0,534
2014	0,528
2015	0,535

Fonte: *Ministerio de Energía y Minería – Presidencia de la Nación – Argentina*

3.5.2 Cálculo da redução de emissões de CO₂ na residência em estudo.

Com a instalação do painel solar na residência em estudo, serão economizados 7.872,5 kWh/ano. Tomando como base o fator de emissão correspondente ao ano 2015, a diminuição de CO₂ vai ser 4,21 de toneladas ao ano.

$$\text{Redução de CO}_2 = \text{Redução de energia gerada} \cdot \text{Fator de emissão de CO}_2$$

Equação 6 – Redução de CO₂

$$\text{Redução de CO}_2 = 7,87248 \frac{\text{MWh}}{\text{ano}} \cdot 0,535 \frac{\text{toneladas CO}_2}{\text{MWh}} = 4,21 \frac{\text{toneladas CO}_2}{\text{ano}}$$

O último informe de inventario de Gases de efeito estufa do país corresponde ao ano 2014. Segundo este informe, na Argentina se emitiram 368,3 MtCO₂eq. Destas emissões, 42,9 MtCO₂eq foram emitidas durante o processo de geração de energia elétrica (*Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2017*).

A redução na residência em estudo corresponde a um 0,00001% das emissões geradas no país para a geração de eletricidade. Vão ser necessárias 100.000 instalações deste tipo para conseguir reduzir em um 1% as emissões de CO₂ geradas durante o processo de geração de eletricidade.

4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Segundo a literatura internacional, o tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos é superior a 20 anos. Comparativamente a um tempo de retorno do investimento de 10 anos e nove meses, este não se torna muito atrativo no contexto atual argentino.

Para conseguir chegar a um tempo de retorno mais atrativo para o consumidor, faz falta que o preço dos equipamentos baixe ou que as tarifas aumentem. No caso de preço dos equipamentos, e sendo que é uma tecnologia ainda nova na Argentina, é provável que eles baixem enquanto a tecnologia seja mais utilizada. No caso dos preços das tarifas, elas estiveram aumentando significativamente nos últimos tempos. Desde fevereiro de 2017 até agosto de 2018, o aumento na tarifa foi desde 67% até 195%, dependendo da faixa de consumo, e o Governo Argentino já anunciou mais aumentos de tarifas para o ano próximo.

Além disso, a energia elétrica tem um subsídio, a tendência indica que estes subsídios vão ser eliminados no curto-mediano prazo.

Como foi descrito na introdução, a lei também prevê a criação de um fundo fiduciário, o qual já tem um item de orçamento atribuído, que deve implementar um preço adicional de incentivo em relação à energia gerada de fontes renováveis por um tempo limitado ou outorgar bonificações para a compra de equipamentos de geração distribuída a partir de energias renováveis.

Com o descrito acima, e tendo em conta que o preço da energia elétrica está aumentando a um ritmo maior do que a inflação do país, é esperável que no curto prazo, o tempo de retorno de investimento seja diminuído a valores mais atrativos para o consumidor.

Segundo a simulação feita do preço de tarifas necessário para atingir um tempo de retorno de investimento mais atrativo, as mesmas deveriam aumentar 58%. Com o ritmo de aumento que as tarifas tiveram, é possível pensar que esse valor pode ser atingido nos próximos anos.

Além da economia gerada pela instalação de painéis fotovoltaicos, os mesmos vão gerar também uma diminuição nas emissões de CO₂, um dos gases de efeito estufa, que contribuem ao aquecimento global. A diminuição das emissões causadas pela instalação fotovoltaica na residência podem parecer insignificantes, mas no tempo que este investimento se torne mais viável e mais residências instalem

sistemas fotovoltaicos, essa diminuição vai aumentar até atingir valores mais significativos. Com o aumento da consciência ambiental da população, este também vai ser um motivo a mais a pensar como benefício na hora de fazer a instalação de um sistema fotovoltaico.

REFERÊNCIAS

ARGENTINA. **Ley n. 27.724, de 27 de dezembro de 2017.** *Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública.* Disponível em: <https://www.infoleg.gob.ar>. Acesso em: 03/02/2018.

ARGENTINA. **Ley n. 24.724, de 21 de outubro de 2015.** *Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Modificación. Creación del fondo fiduciario público.* Disponível em: <https://www.infoleg.gob.ar>. Acesso em: 03/02/2018.

ARGENTINA. *Ministerio de Energía. Ente Nacional Regulador de la Electricidad. Resolución ENRE 603/2017.* Disponível em: < <https://www.infoleg.gob.ar> > Acesso em: 23/08/2018.

ARGENTINA. *Ministerio de Energía. Ente Nacional Regulador de la Electricidad. Resolución ENRE 208/2018.* Disponível em: < <https://www.argentina.gob.ar/enre/normativa/resoluciones> > Acesso em: 20/06/2018.

ARGENTINA. *Ministerio de Energía. Ente Nacional Regulador de la Electricidad. Resolución ENRE 628/2008.* Disponível em: < <https://www.infoleg.gob.ar> > Acesso em: 23/08/2018.

DUFFIE, J.A.; BECMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, New Jersey: Fourth edition, John Wiley & Sons Inc., 2013.

EDENOR SA. Disponível em <www.edenor.com.ar> Acesso em 23/08/2018.

EL-SHARKAWI, Mohamed A. **Electric Energy: An Introduction**, Boca Raton: Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.

FIASA ARGENTINA. Disponível em <www.fiasa.com.ar> Acesso em 20/05/2018.

FRONIUS. Disponível em <www.fronius.com/en> Acesso em 22/05/2018.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems; PSE Conferences & Consulting GmbH. Photovoltaics Report, Freiburg, 26 February 2018. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de>>. Acesso em 09/05/2018.

Global Solar Atlas. Disponível em <globalsolaratlas.info> Acesso em 17/04/2018.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energias renováveis: um futuro sustentável.** Revista USP, Brasil, n. 72, p. 6-15, feb. 2007. ISSN 2316-9036. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13564/15382>>. Acesso em: 31/07/2018.

LV-Energy S.A. Disponível em <<http://www.lv-energy.com/#!/-home/>> Acesso em 15/08/2018

Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación, Argentina. Cálculo del factor de emisión de CO₂ 2015. Disponível em: <<http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=2311>> Acesso em: 06/03/2018.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación, Argentina. Inventario Nacional de Gases de Efecto invernadero. Disponível em <<https://inventariogei.ambiente.gob.ar/resultados>> Acesso em: 21/08/2018.

PEREIRA, E.B.; RAMOS MARTINS, F.; RODRIGUES GONÇALVES, A.; SANTOS COSTA, R.; LOPES DE LIMA, F.J.; RÜTHER, R.; LUNA DE ABREU, S.; TIEPOLO, G.M.; VITORIO PEREIRA, S.; GONÇALVES DE SOUZA, J. **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos, SP: INPE, 2017. 88 p. ISBN 9788517000904.

TIEPOLO, G.M. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná**. 2015. 229 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas – Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba – PR, 2015.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 2010. 189 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – UFSC, Florianópolis – SC, 2010.

VIANA, T.S. **Potencial de Geração de Energia Elétrica com Sistemas Fotovoltaicos com Concentrador no Brasil**. 2010. 134 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – UFSC, Florianópolis – SC, 2010.

VILLALVA, M.; GRADELLA, M.; GAZOLI, J.; **Energia Solar Fotovoltaica – Introdução**. São Paulo: Érica, 2012.