

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Caroline Obregon Pilz

**ANÁLISE DE MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

Santa Maria, RS, Brasil  
2019

**Caroline Obregon Pilz**

**ANÁLISE DE MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE SANTA MARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação  
em Engenharia Elétrica, da  
Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito para  
obtenção do grau de **Engenheira  
Eletricista.**

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

Santa Maria, RS  
2019

**Caroline Obregon Pilz**

**ANÁLISE DE MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE SANTA MARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Engenheira Eletricista**.

**Aprovado em 12 de julho de 2019:**

---

**Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Eleonora Fripp Lazzari, Eng. (UFSM)**

---

**Bárbara Righi Cenci, Eng. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que acreditou em mim e torceu para que eu alcançasse meus objetivos e sonhos.

À minha mãe Dirce, por todo amor, carinho e atenção em minha vida. Mulher guerreira, meu porto seguro e razão da minha existência. Agradeço a compreensão quando eu não pude me fazer presente, as rezas na véspera das provas e o consolo quando necessário.

Ao meu padrasto Ivo, pelo apoio e pelas palavras de incentivo sempre que precisei. Por participar da minha criação, priorizar minha educação e proporcionar as condições necessárias para que eu pudesse realizar essa conquista. Além das orações e ligações de todas as noites.

Ao meu pai Alcidio (in memoriam), onde quer que esteja, por todos os ensinamentos, momentos e lembranças.

Ao meu orientador e professor Daniel Pinheiro Bernardon, sempre disposto a compartilhar seu conhecimento e ajudar no desenvolvimento acadêmico e profissional. Por acreditar no meu potencial, orientar e tornar possível este trabalho.

À Eleonora Fripp Lazzari e Bárbara Righi Cenci, por aceitarem o convite para compor a banca avaliadora e fazerem parte da minha trajetória.

Aos meus amigos, àqueles que pude contar nas horas difíceis e também nas comemorações. Às amigas especiais que tenho, que não medem esforços para se fazerem presente e ajudarem quando necessário.

Aos meus colegas e amigos da Engenharia, pela parceria, disponibilidade e ajuda durante o curso. Pela convivência diária, por tornarem a sala de aula um ambiente mais alegre e compartilharem aquele chimarrão.

À Universidade Federal de Santa Maria, aos docentes e funcionários por me proporcionarem ensino, pesquisa e extensão públicos e excelentes. Em especial à Coordenação e à Secretaria do Curso de Engenharia Elétrica, que sempre forneceram o suporte necessário no início, meio e fim dos semestres.

*“Ao fim do dia podemos aguentar muito mais do que pensamos que podemos. ”*

*(Frida Kahlo)*

## RESUMO

### ANÁLISE DE MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

AUTORA: Caroline Obregon Pilz

ORIENTADOR: Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng.

O seguinte trabalho apresenta uma análise sobre o impacto técnico e financeiro da aplicação de Minigeração Solar Fotovoltaica na Universidade Federal de Santa Maria, cliente do grupo A4, considerando a modalidades tarifária azul e as normas regulamentárias. Devido crescente aumento da demanda energética, observa-se a inserção de novas fontes de energia elétrica, além de consumidores que geram sua própria eletricidade. A metodologia proposta considera as curvas de carga da unidade consumidora, os recursos naturais do local e a configuração do sistema. Esta base de dados, aliada ao software Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), possibilita realizar a simulação da situação atual e de um segundo caso em um horizonte de vinte anos. Tendo em vista a redução da fatura de energia elétrica e o desenvolvimento sustentável, serão feitos estudos de casos para a obtenção de resultados. Assim, será mostrada a viabilidade econômica da implementação de usinas fotovoltaicas em uma instituição pública de ensino.

**Palavras-chave:** Minigeração Solar Fotovoltaica, Usina Solar, Geração Distribuída, Eficiência Energética, Energias Renováveis, *Software Homer*.

## **ABSTRACT**

### **ELECTROMAGNETIC ANALYSIS IN DISTRIBUTION SYSTEMS USING ATPDraw SOFTWARE**

AUTHOR: Caroline Obregon Pilz  
ADVISOR: Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng.

The following work presents an analysis on the impact and the financial performance of the Solar Photovoltaic Minigeration at the Federal University of Santa Maria, customer of group A4, considering the tariff and regulatory conditions. Related source of energy energy, observation-on the new power sources of electrical energy, beyond levels of generate their own electricity. By the way, consider the charge curves of the consumer unit, the local natural resources, and the system configuration. This database, coupled with the software Hybrid Optimization Model for Renewable Electric Energies (HOMER), made possible an approximation of the current and a second case in a horizon of twenty years. Reduce energy billing and sustainable development, case-study studies for a source of results. Thus, it will be presented a viability of the implementation of the photovoltaic companies in a public educational institution.

**Keywords:** Photovoltaic Solar Minimation, Solar Power, Distributed Generation, Energy Efficiency, Renewable Energies, Homer Software.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Quantidade de Unidades Consumidoras com GD FV no ano .....	2
Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira em 2017 .....	8
Figura 3 – Participação de cada fonte na geração distribuída em 2017 .....	8
Figura 4 – Radiação solar no plano inclinado, média anual (kWh/m <sup>2</sup> ) .....	10
Figura 5 – Preço do sistema fotovoltaico para o cliente final .....	11
Figura 6 – Efeito fotovoltaico na junção pn .....	13
Figura 7 – Representação de um arranjo fotovoltaico .....	14
Figura 8 – Painel Canadian Solar 275 W .....	15
Figura 9 – Inversor Ingeteam de String Trifásico 100 kWp .....	16
Figura 10 – Sistema Fotovoltaico com Armazenamento de Energia .....	17
Figura 11 – Complexo Pirapora .....	18
Figura 12 – Subgrupos do Grupo A – Média e Alta Tensão .....	20
Figura 13 – Subgrupos do Grupo B – Baixa Tensão .....	20
Figura 14 – Escolha de componentes no Homer .....	24
Figura 15 – Diagrama do sistema escolhido .....	25
Figura 16 – Entrada de valores de carga primária .....	25
Figura 17 – Preço da energia da rede em dias úteis e finais de semana .....	26
Figura 18 – Cadastro de recursos solares .....	27
Figura 19 – Cadastro de dados sobre os painéis fotovoltaicos .....	28
Figura 20 – Cadastro de dados econômicos do projeto .....	28
Figura 21 – Perfil da carga em dias úteis no mês de abril .....	30
Figura 22 – Perfil da carga em sábados, domingos e feriados .....	30
Figura 23 – Perfil de carga sazonal .....	30
Figura 24 - Representação Gráfica do Consumo em kWh na UFSM .....	32
Figura 25 – Definição de preço e demanda da rede .....	32
Figura 26 – Radiação global horizontal na cidade de Santa Maria - RS .....	33
Figura 27 – Usina Solar na Universidade Federal de Santa Maria .....	34
Figura 28 – Representação da configuração do sistema no Homer .....	35
Figura 29 – Comparação econômica entre o caso atual e o caso base .....	36
Figura 30 – Fluxo de caixa acumulado do caso atual x caso base .....	37
Figura 31 – Resumo do fluxo de caixa do caso atual .....	37
Figura 32 – Produção média de eletricidade por mês .....	38

Figura 33 – Representação gráfica PV x Rede x Carga do caso atual.....	39
Figura 34 – Comparação econômica entre o caso 2 e o caso base .....	40
Figura 35 – Fluxo de caixa acumulado do caso 2 comparado ao caso base..	41
Figura 36 – Resumo do fluxo de caixa do caso 2 .....	42
Figura 37 – Produção média de eletricidade por mês .....	42
Figura 38 – Representação gráfica PV x Rede x Carga do caso 2.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de painéis solares.....	15
Tabela 2 - Consumo mensal na UFSM entre 2018 e 2019.....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>GD</b>	Geração Distribuída
<b>SCEE</b>	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
<b>UFSM</b>	Universidade Federal de Santa Maria
<b>RGE</b>	Rio Grande Energia
<b>CPFL</b>	Companhia Piratininga de Força e Luz
<b>PRODIST</b>	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
<b>HOMER</b>	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
<b>NREL</b>	Laboratório Nacional de Energias Renováveis
<b>VPL</b>	Valor Presente Líquido
<b>CEMIG</b>	Companhia Energética de Minas Gerais
<b>FIEMG</b>	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
<b>LOA</b>	Lei Orçamentária Anual

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Objetivo Geral.....	4
1.3.2	Objetivo Específico.....	4
1.4	Organização dos Capítulos.....	5
2	MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA.....	7
2.1	Considerações Teóricas.....	7
2.1.1	Potencial Solar no Brasil.....	10
2.1.2	Aspectos Econômicos.....	11
2.2	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA.....	12
2.2.1	Módulos Fotovoltaicos.....	12
2.2.2	Inversores.....	16
2.2.3	Sistemas com Armazenamento de Energia.....	17
2.2.4	Usina Solar.....	18
2.3	ASPECTOS REGULATÓRIOS.....	19
2.3.1	Resolução Normativa Nº 414/479.....	19
2.3.2	Resolução Normativa Nº 482/687.....	22
3	SOFTWARE HOMER.....	23
3.1	Considerações teóricas.....	23
3.2	Apresentação do Ambiente de Trabalho.....	24
3.2.1	Identificação e Cadastro de Dados para Simulação.....	24
4	ESTUDO DE CASOS.....	29
4.1	ANÁLISE DE DADOS.....	29

4.1.1	Curva de carga.....	29
4.1.2	Tarifas de Energia da Rede Elétrica.....	31
4.1.3	Recurso Solar e Equipamentos Utilizados .....	33
4.2	SITUAÇÃO ATUAL COM PV DE 100 KW.....	34
4.2.1	Considerações Teóricas.....	34
4.2.2	Análise e Resultados.....	35
4.3	CASO 2 COM PV DE 5.000 KW .....	39
4.3.1	Considerações Teóricas.....	39
4.3.2	Análise e Resultados.....	40
5	CONCLUSÃO .....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

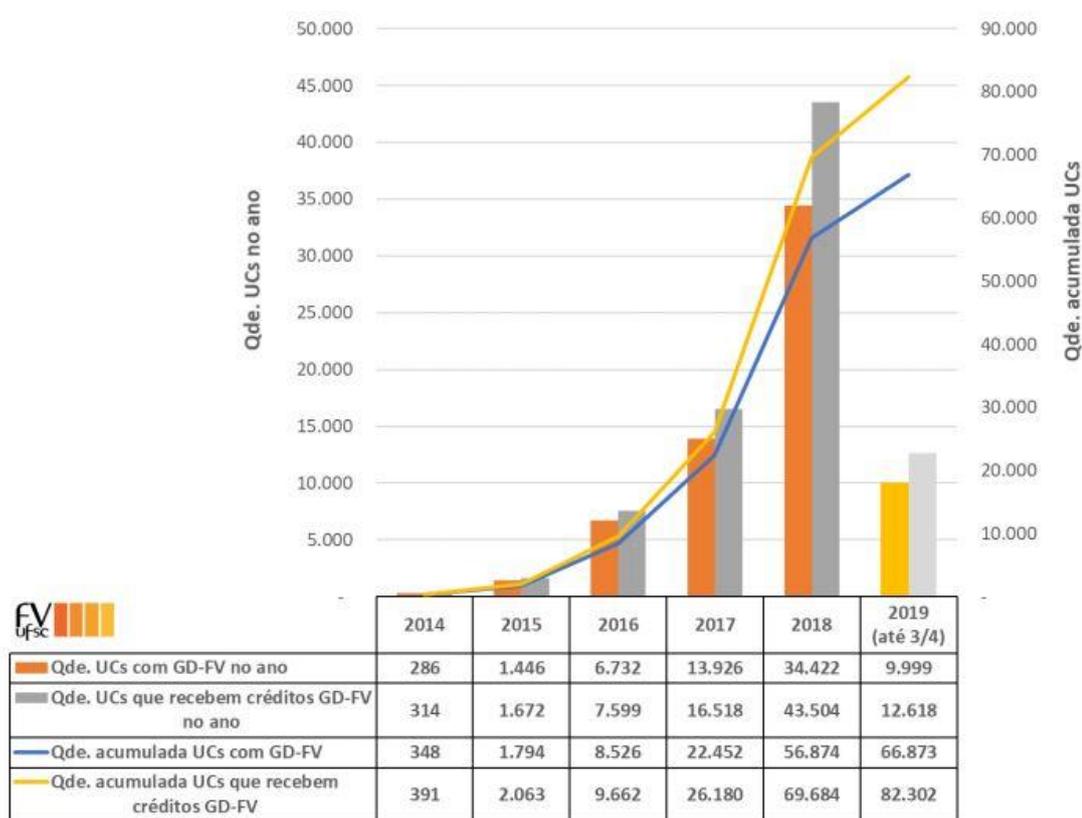
Em território brasileiro, a energia elétrica sempre foi gerada predominantemente por hidroelétricas, sendo assim, dependente da sazonalidade e das precipitações pluviométricas. Em um cenário de baixo nível dos reservatórios de água e aumento da demanda energética, o governo obrigou-se a acionar usinas termoelétricas, que são poluentes e produzem energia de custo elevado. Assim, o investimento em fontes alternativas de geração de energia torna-se uma opção para minimizar custos, não depender dos efeitos nocivos das mudanças climáticas e otimizar a distribuição. As características geográficas do país e a inserção da Geração Distribuída (GD), facilitam a exploração de vários tipos de energias renováveis, como por exemplo a solar fotovoltaica. Esse tipo de energia não esgota os recursos naturais, não emite gases tóxicos na atmosfera e diversifica o abastecimento energético.

Além de sustentável, a tecnologia de geração de energia solar fotovoltaica tornou-se viável ao consumidor com a implementação do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), que possibilita que a energia excedente de autoprodução seja injetada na rede da distribuidora local, gerando créditos para uso futuro. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pela regulação das leis aprovadas no Congresso Nacional e no Executivo Federal Brasileiro referente ao sistema de distribuição de energia elétrica. Através da Resolução Normativa 482/2012 (REN 482/2012), as concessionárias passaram a aprovar projetos e a viabilidade econômica do sistema tornou-se favorável ao consumidor. Em 2015, por meio da Resolução 687/2015, houve a introdução de conceitos abrangendo sistemas comunitários, além de permitir o autoconsumo remoto.

Atualmente, no Brasil o maior percentual de sistemas de geração distribuída fotovoltaica (GD FV) instalados tem potência entre 2 e 3 kWp (quilowatt pico), 22% do total, considerados sistemas pequenos. Considerando apenas a mini GD FV no país, 78% no Brasil é composta de sistemas com no máximo 200 kWp e 55% das unidades consumidoras que recebem créditos, possuem sistemas entre 500 e 1000 kWp. Em termos de potência, 39% da mini GD FV é composta por sistemas com até 200 kWp, e 80% da mini-GD-FV é composta por sistemas com até 1000 kWp (RÜTHER, 2019).

De acordo com a Figura 1, é possível observar o crescimento da quantidade de unidades consumidoras com GD FV entre 2014 e 2019.

Figura 1 – Quantidade de Unidades Consumidoras com GD FV no ano



Fonte: (RÜTHER, 2019)

Nas universidades, o número de alunos matriculados cresce a cada ano, conseqüentemente o consumo de energia e a fatura de energia aumentam. Se tratando de instituições públicas, os gastos se elevam em contrapartida com os investimentos, pois as mesmas estão sofrendo cortes orçamentais há alguns anos.

O repasse de verbas para a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) vem recebendo cortes nos últimos anos. Para 2019, a previsão de cerca de R\$ 130 milhões para custeio e de R\$ 12,9 milhões para investimentos e capital, que constam na Lei Orçamentária Anual (LOA), preocupa ainda mais a Reitoria, especialmente os valores para investimento, bem abaixo dos que foram aplicados no ano passado (UFSM, 2019).

No ano de 2018, a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a Rio Grande Energia (RGE Sul) e a Companhia Piratininga de Força e Luz (CPFL Energia)

implementaram uma Usina de Minigeração Solar Fotovoltaica instalada no campus sede da Universidade, no bairro Camobi. A usina é uma das ações do Projeto de Eficiência Energética da UFSM, desenvolvido pela RGE Sul, por meio do Programa de Eficiência Energética regulado pela ANEEL.

Dessa maneira, podem ser realizados estudos considerando a minigeração implementada, além da possibilidade de expandir o sistema atual, aumentando a potência instalada. Com o propósito de obter a análise desejada, ferramentas computacionais podem ser utilizadas para avaliação do projeto e simulação dos resultados.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diante de um cenário onde o consumo da energia elétrica é crescente e os impactos ambientais de sua captação são relevantes, as fontes renováveis de energia apresentam-se como a principal opção para atender as demandas com qualidade e segurança. Tendo em vista que estas apresentam baixo impacto ao meio ambiente e contribuem para um desenvolvimento sustentável. A geração fotovoltaica é um modo de se obter energia limpa, renovável e tem a vantagem de produzir energia no próprio local de consumo, minimizando perdas por transmissão e distribuição. Considerando aspectos econômicos, as tarifas estão subindo de preço consideravelmente, enquanto os painéis solares apresentam queda nos valores nos últimos anos.

A inserção de uma usina solar em uma universidade pode trazer benefícios tanto para os alunos, utilizando o projeto a fim de estudos, bem como financeiramente, ao produzir energia e diminuir o valor da conta de luz. Para isso, serão realizadas simulações de diferentes sistemas a fim de analisar a efetividade financeira e os impactos ao longo de meses e anos, levando em consideração as curvas de cargas da instituição.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma metodologia para avaliar a viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica instalado na Universidade Federal de Santa Maria, considerando as variações de cargas através de curvas típicas de carga, visando contribuir com a redução dos gastos com faturas de energia elétrica da RGE Sul.

### 1.3.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos consistem na compreensão do software HOMER, a fim de desenvolver a configuração do sistema de GD conectado à rede de energia. Ainda serão realizados estudos de casos que consistem em simulações de minigeração por meio de usinas solares com módulos fotovoltaicos e inversores. Para obter os resultados, será feito um levantamento de informações e será analisado o perfil de carga da universidade em dias de semana e finais de semana, ao longo dos meses. Serão verificadas as contas de energia elétrica da unidade consumidora, considerando sua classificação, as tarifas na demanda ponta e fora ponta e as normas regulatórias.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A divisão do trabalho consiste em cinco capítulos e mais referência bibliográfica, organizados da seguinte forma:

### 1) Introdução

Esse capítulo apresenta o contexto geral de microgeração e minigeração solar fotovoltaica no Brasil, utilizando dados de balanços energéticos, pesquisas e notícias sobre o assunto abordado. Além das considerações iniciais, elabora-se uma justificativa que visa a motivação para o Trabalho de Conclusão de Curso e na sequência são evidenciados os objetivos geral e os específicos.

### 2) Minigeração Solar Fotovoltaica

O capítulo 2 destina-se às considerações teóricas a respeito da minigeração solar fotovoltaica, à configuração dos sistemas e os aspectos regulatórios. Abrangendo a potência solar no Brasil, os aspectos econômicos, módulos fotovoltaicos, inversores, sistemas com armazenamento de energia e usinas solares. São abordadas as resoluções normativas Nº 414/479, contendo a classificação dos consumidores e as modalidades tarifárias e também a Nº 482/687, que incentiva e regulamenta a geração com fontes renováveis conectados à rede.

### 3) Software Homer

O capítulo 3 apresenta informações teóricas sobre o *software* Homer, como a ambientação de trabalho, a identificação e o cadastro de dados para simulação, a escolha dos componentes e a modelagem do diagrama. Conhecendo a interface e as funções do programa, é possível obter resultados confiáveis.

#### 4) Estudo de Casos

No capítulo 4 são feitas as análises e as simulações dos casos estudados. O primeiro expõe a situação atual, com painéis fotovoltaicos gerando 100 kW, o segundo refere-se a um sistema de 5.000 kW. Em ambos os casos são desenvolvidos fundamentos teóricos e práticos, utilizando o Homer. Assim, calcula-se o valor presente líquido do projeto, o fluxo de caixa, a produção de eletricidade, o perfil de produção e consumo. Os resultados obtidos são comparados ao caso base, que contempla o abastecimento exclusivamente pela rede de distribuição.

#### 5) Conclusão

O capítulo 5 traz as considerações finais do trabalho após a observação dos resultados obtidos na parte prática. O mesmo ressalta os impactos, a viabilidade e as vantagens da implementação do projeto.

#### Referências Bibliográficas

O campo das referências bibliográficas informa as fontes de informação e pesquisa utilizadas na construção do trabalho.

## 2 MINIGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

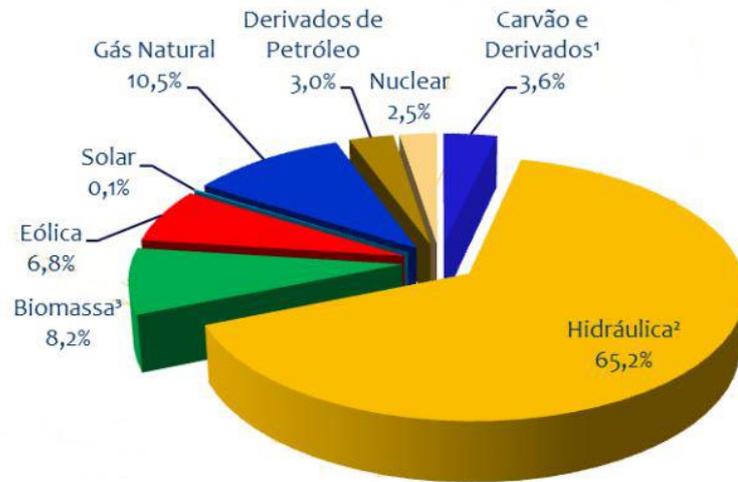
A geração distribuída tem um grande impacto na rede tradicional de energia elétrica, principalmente na proteção e qualidade da energia, exigindo preparo e estudo pelas concessionárias quanto à estabilidade e à qualidade da energia fornecida. São muitos os impactos da geração distribuída na rede, principalmente quanto ao grau de inserção, ao controle dos níveis de tensão, aos níveis de curto-circuito das redes, à intermitência das fontes e à qualidade de energia (BERNARDON *et al.*, 2015).

### 2.1 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

As fontes renováveis de energia são as consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização e como principais exemplos dessas fontes temos a energia hidráulica, fotovoltaica, eólica e biomassa. Já as não renováveis são consideradas as que se baseiam em recursos finitos e as mais importantes a citar são o petróleo, o carvão, gás natural e os materiais radioativos. A exploração de qualquer fonte de energia provoca impactos no meio ambiente. Nos processos de fabricação de módulos fotovoltaicos empregam-se componentes tóxicos. Enquanto nas hidrelétricas, há formação de represas que causam alterações irreversíveis no local de inundação. O conceito de energia alternativa não é exclusivo para fontes renováveis, mas é composto em sua grande maioria por elas (VILLALVA, 2015).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (2018) o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente de origem renovável, representando 80,4 % da oferta interna de energia elétrica, resultante do somatório entre a produção nacional e as importações, conforme apresenta a Figura 2. A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 588,0 TWh em 2017, resultado 1,6% superior ao de 2016. As centrais elétricas de serviço público, participaram com 83,5% da geração total. A geração hídrica, principal fonte de produção de energia elétrica no Brasil, teve sua participação reduzida em 2,6% na comparação com o ano anterior (EPE, 2018a).

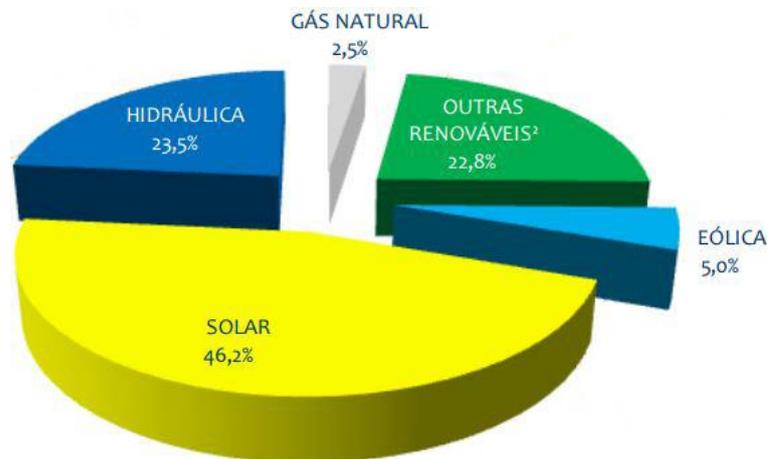
Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira em 2017



Fonte: (EPE, 2018a)

Quanto a micro e mini geração distribuída de energia elétrica, houve crescimento incentivado por ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte (*net metering*). Em 2017, a micro e mini geração distribuída atingiu 359,15 GWh com uma potência instalada de 246,1 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 165,87 GWh e 174,5 MW de geração e potência instalada respectivamente, observado a partir da Figura 3 (EPE, 2018a).

Figura 3 – Participação de cada fonte na geração distribuída em 2017



Fonte: (EPE, 2018a)

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade. Os estímulos à geração distribuída se justificam pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles, estão o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2015).

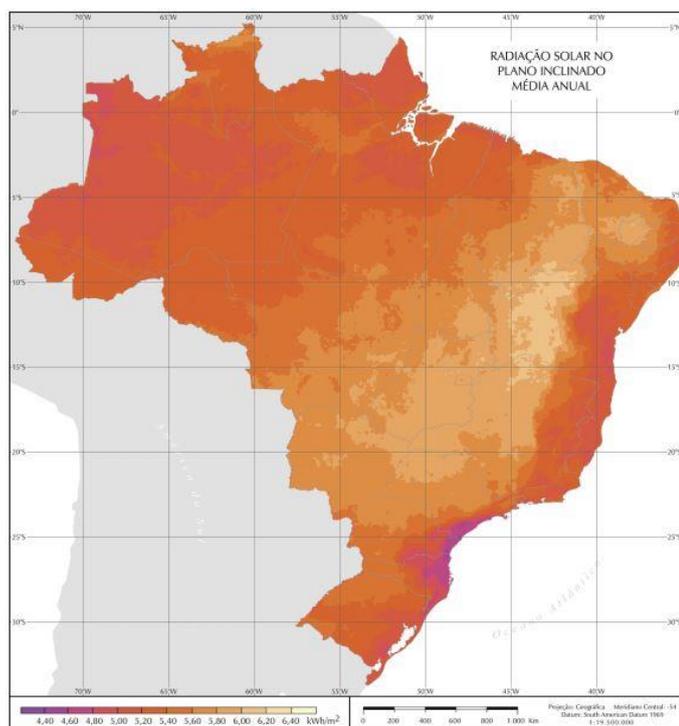
Segundo as novas regras, que começaram a valer em 1º de março de 2016, é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

Ao contrário de muitas tecnologias convencionais de geração elétrica, a fotovoltaica tem experimentado uma redução de custos ao longo dos últimos anos, derivada de inovações tecnológicas, aumentos na eficiência e economia de escala, principalmente. Esta redução de custos tem sido crucial na difusão de sistemas fotovoltaicos durante a última década. Estima-se que a tendência continue ao longo do horizonte 2050, embora as quedas mais acentuadas devam acontecer ainda no horizonte decenal. A difusão de sistemas fotovoltaicos se iniciou a partir da geração de pequena escala, havendo ocorrido seu desenvolvimento tecnológico, ganhos de escala e redução de custos através desse mercado (EPE, 2018b).

### 2.1.1 Potencial Solar no Brasil

O território brasileiro apresenta grande potencial solar, sua localização próxima da linha do Equador e grande parte tropical faz com que apresente uma radiação solar uniforme, com médias anuais relativamente altas em todo país, apesar das diferentes características climáticas. Ainda, é possível ajustar a posição do painel solar de acordo com a latitude local e o período do ano em que se requer mais energia. No caso do sul do Brasil, um sistema de captação solar fixo deve ser orientado para o Norte, com ângulo de inclinação semelhante ao da latitude local. A Figura 4 mostra o mapa da média anual da irradiação solar diária incidente sobre um plano com inclinação igual a latitude do pixel em consideração. Não levando em conta a topografia local, essa configuração é a que possibilita a máxima captação da energia solar incidente (PEREIRA *et al.*, 2006).

Figura 4 – Radiação solar no plano inclinado, média anual (kWh/m<sup>2</sup>)



Fonte: (PEREIRA *et al.*, 2006)

## 2.1.2 Aspectos Econômicos

Outro fator que impulsiona o crescimento do mercado fotovoltaico é a diminuição dos preços, os sistemas estão cada vez mais viáveis economicamente. Os avanços tecnológicos na área de semicondutores e o aumento da produção de células solares ajudaram no barateamento dos equipamentos e na redução do tempo de retorno sobre o investimento. A partir da Figura 5, percebe-se que um sistema de 50 kWp que custava R\$ 7,00 por kWp em junho de 2016, passou a custar R\$ 4,41 por kWp em junho de 2018.

Figura 5 – Preço do sistema fotovoltaico para o cliente final



Fonte: (RÜTHER, 2019)

O sistema de compensação de créditos no Brasil é conhecido como *net metering*, nesse tipo de compensação a diferença entre a energia consumida e a energia injetada é medida em kWh, e é a que vai ser cobrada na conta de energia. A medição da energia consumida e gerada pode ser feita através de medidores bidirecionais ou unidirecionais. Quando ocorre a conexão da microgeração distribuída, a concessionária é a responsável pelo fornecimento do medidor; entretanto para a conexão de minigeração distribuída, o cliente é o responsável pelos custos da adequação do sistema. O medidor bidirecional mede o consumo de energia da rede elétrica da concessionária e também a geração de energia injetada na rede.

## 2.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Os sistemas fotovoltaicos geram energia elétrica em corrente contínua (CC) através de painéis solares. Para transformar em corrente alternada (CA) é necessário o uso de um inversor e para fins de proteção são utilizados diodos. Quando conectados à rede de distribuição, são chamados *On-grid*, enquanto os isolados, que não apresentam qualquer ligação com a rede, denominam-se *Off-Grid*. No primeiro caso, o sistema é vantajoso pelo fato de não necessitar de banco de baterias, pois a energia excedente pode ser injetada na rede. Para isso, é necessário um medidor bidirecional para poder medir quanto de energia foi injetada ou retirada.

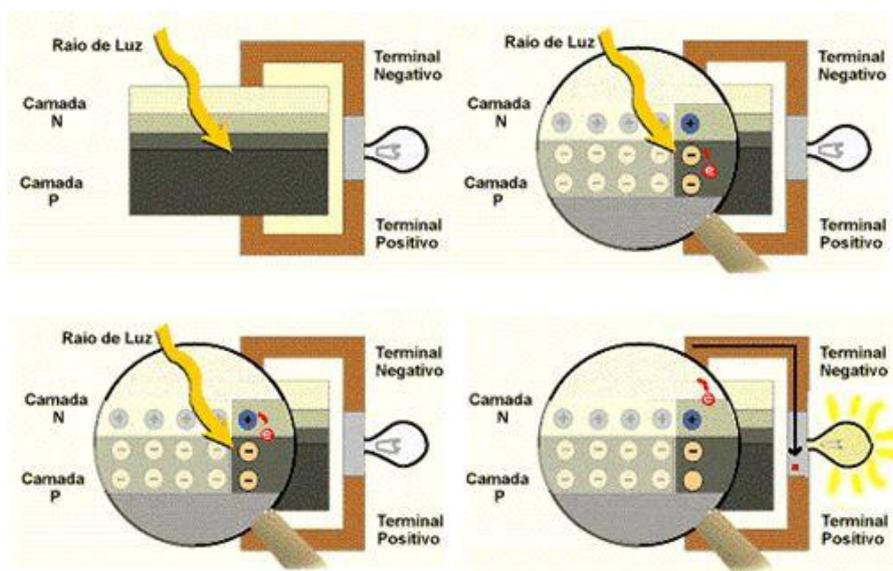
### 2.2.1 Módulos Fotovoltaicos

A geração fotovoltaica faz o uso de elementos semicondutores, capazes de gerar eletricidade a partir da conversão direta de energia solar em energia elétrica através de células solares. Esse sistema é composto basicamente por arranjos de células fotovoltaicas na configuração série e/ou paralelo, esses arranjos são denominados módulos fotovoltaicos. Dependendo da potência, nível de tensão e corrente desejados no projeto, os módulos também podem ser associados em série ou paralelo, constituindo por fim um painel fotovoltaico (BERNARDON *et al.*, 2015).

Devido a características atômicas como tetravalência e ligações covalentes, o semicondutor mais usado é o silício. Se forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama junção pn. Através dessa junção, uma corrente é gerada e o deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial chamada Efeito Fotovoltaico. Se as duas extremidades do silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas (CRESESB, 2008).

Ao observar-se a Figura 6, é possível perceber o efeito fotovoltaico na junção pn.

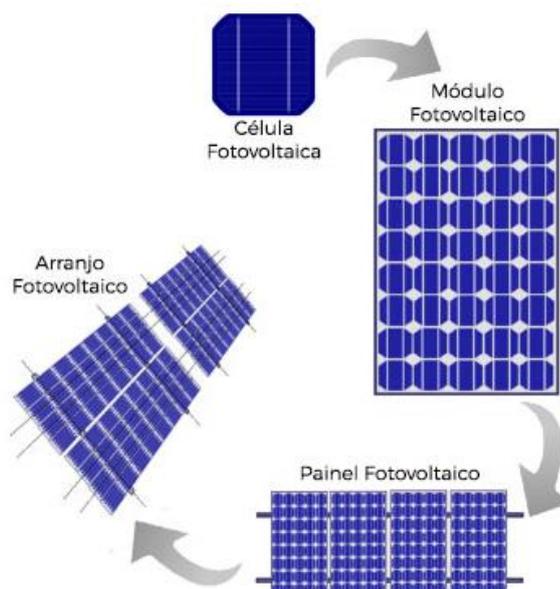
Figura 6 – Efeito fotovoltaico na junção pn



Fonte: (CRESESB, 2008)

As células fotovoltaicas são responsáveis por converter a energia luminosa em energia elétrica. Quanto aos tipos de células fotovoltaica, as mais utilizadas comercialmente são constituídas de cristais monocristalinos, através de processos de purificação que tornam esse tipo mais caro, contudo alcança um alto rendimento energético. Já as formadas por cristais policristalinos são criadas por um processo mais simples, seu custo é mais baixo, todavia sua eficiência é inferior quando comparada com a monocristalina. Um conjunto dessas partículas, constitui um módulo fotovoltaico, que agrupados formam um painel. A estrutura de um arranjo fotovoltaico pode ser observada a partir da Figura 7.

Figura 7 – Representação de um arranjo fotovoltaico



Fonte: (ROSSI, 2018)

O número de células conectadas ao módulo e seu arranjo depende da tensão utilizada e da corrente elétrica desejadas. Eles podem variar em potência, medida em Watt pico (Wp), dimensão, eficiência e outras variáveis, além de serem influenciados diretamente pela temperatura do ambiente. Quando são conectados em série, o terminal positivo de um é ligado no negativo do outro e há um acréscimo de tensão enquanto a corrente se mantém constante. De outra maneira, em paralelo os terminais positivos são conectados entre si, bem como os negativos, resultando na soma das correntes e inércia da tensão. De acordo com a Tabela 1, tem-se alguns exemplos de painéis policristalinos de modelos diferentes, que são comercializados no mercado. As informações foram retiradas da ficha de dados do produto (*datasheet*).

Tabela 1 – Comparativo de painéis solares

Potência (Wp)	Dimensões (mm <sup>2</sup> )	Número de Células	Eficiência	Marca	Peso (Kg)
255	1658x922x60	60	15,5%	Jinko Solar	24
260	1650x992x40	60	15,88%	Canadian Solar	18,2
265	1658x922x60	60	16,11%	Jinko Solar	24
265	1650x992x40	60	16,19%	Canadian Solar	18,2
270	1658x922x60	60	16,42%	Jinko Solar	24
270	1650x992x40	60	16,5%	Canadian Solar	18,2
275	1658x922x60	60	16,72%	Jinko Solar	24
275	1650x992x40	60	16,8%	Canadian Solar	18,2
295	1956x992x40	72	15,2%	Jinko Solar	26,5

Fonte: Autora, baseado em *datasheets* dos módulos

O modelo adotado no estudo de caso é o Canadian Solar de 275 W e 16,8% de eficiência, representado a partir da Figura 8.

Figura 8 – Painel Canadian Solar 275 W



Fonte: *Datasheet* do produto

## 2.2.2 Inversores

Os inversores (ou conversores CC-CA) são equipamentos elétricos que convertem a corrente contínua produzida pelo painel fotovoltaico em corrente alternada, que pode ser utilizada em diferentes aparelhos elétricos. Além disso, garantem segurança ao sistema e fornecem dados para monitoramento de desempenho do sistema. Em residências, um inversor pode ser instalado perto do quadro de luz, já em usinas de minigeração, pode-se construir uma sala somente para o equipamento, pois ele é maior em tamanho e ocupa mais espaço físico.

Esse dispositivo pode ser isolado (*Stand-Alone*) ou conectado à rede (*Grid-Tie*), no segundo caso, ele sincroniza a frequência (Hz) e a tensão de saída com a da concessionária distribuidora, além de serem projetados para desligar da rede caso haja queda de energia. O equipamento possui interruptores ou chaves eletrônicas e pode ou não, possuir um transformador em seu interior. Recomenda-se que o mesmo tenha uma eficiência de no mínimo 94% e siga as recomendações da NBR IEC 60529.

O inversor utilizado no estudo de caso possui alta potência de saída (até 110 kW se o equipamento se ligar a uma rede de 440 Vac) e permite a redução do número de inversores requeridos para a montagem da instalação fotovoltaica. Assim, minimiza a despesa total em mão de obra e cabos, podendo poupar até 20% em cablagem AC, já que não requer cabo neutro, conforme ficha de dados. Um exemplo utilizado em um estudo de caso pode ser observado a partir da Figura 9.

Figura 9 – Inversor Ingeteam de String Trifásico 100 kWp

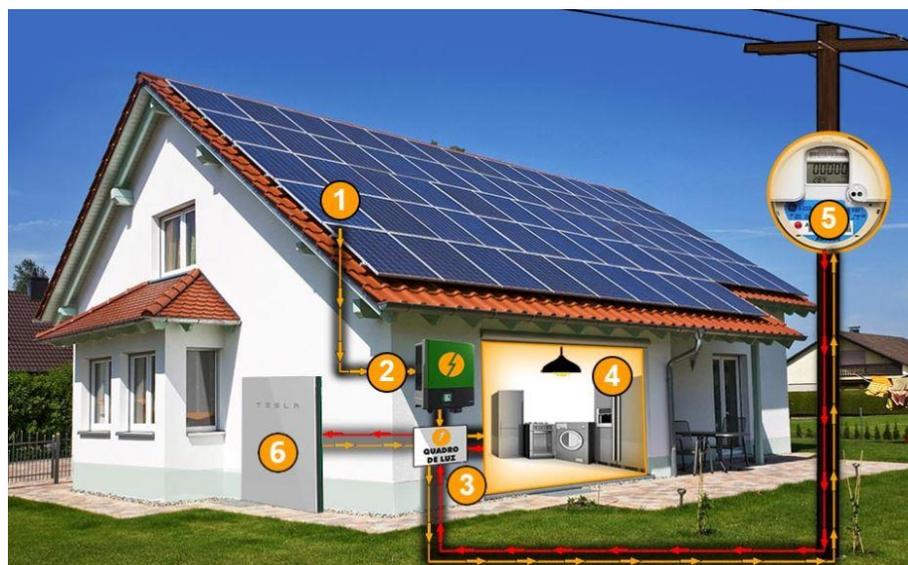


### 2.2.3 Sistemas com Armazenamento de Energia

Quando há necessidade de armazenamento de energia, baterias podem ser empregadas no sistema para garantir o fornecimento em momentos que a geração solar não for suficiente, como no período da noite ou em dias nublados. Também podem ser usadas nos horários de ponta, para diminuir o valor na fatura. No caso de sistemas isolados da rede de distribuição, seu uso se torna indispensável.

Um sistema híbrido solar possibilita a obtenção de energia da luz do sol, da rede e ainda, caso a energia seja interrompida, é possível usar a carga das baterias. Assim, a eletricidade gerada pode ser consumida pelos equipamentos elétricos, ser injetada na rede e gerar créditos ou ainda ser armazenada na bateria. Esse método está representado de acordo com a Figura 10.

Figura 10 – Sistema Fotovoltaico com Armazenamento de Energia



Fonte: (SOLAR, 2018)

## 2.2.4 Usina Solar

Uma usina solar é um sistema fotovoltaico (SFV) de grande porte, projetado para produção e venda de energia elétrica. Diferenciam-se dos sistemas fotovoltaicos instalados em casas e indústrias, pois elas fornecem energia em alta tensão para fins de distribuição. A maior parte das usinas solares são construídas fixamente sobre o solo, mas também podem ser estruturadas com os denominados “*trackers*”, que são seguidores solares que acompanham o movimento do sol. Embora as usinas montadas em sistema de rastreamento aumentam a produção de energia elétrica, elas possuem um custo elevado de operação e manutenção da usina solar (SOLAR, 2017).

A maior usina de energia solar em operação no Brasil, o Complexo Pirapora, está localizado em Minas Gerais e é composto por 11 usinas em operação, com capacidade instalada de 321 MW, ilustrada de acordo com a Figura 11.

Figura 11 – Complexo Pirapora



Fonte: (BAHIA, 2018)

## 2.3 ASPECTOS REGULATÓRIOS

Para garantir segurança e qualidade na energia elétrica, todo projeto de geração de energia elétrica deve atender os requisitos impostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Considerando os aspectos regulatórios da implementação de microgeração e minigeração fotovoltaica no Brasil, é possível observar avanços significativos desde 2011. As modalidades tarifárias podem ser observadas na Resolução Normativa – REN nº 414 de 09 de setembro de 2010 e em sua posterior alteração, a REN nº 479/2012. Em 2010 e 2011 a ANEEL realizou consultas e audiências públicas, resultando na criação da Resolução Normativa – REN nº 482 de 17 de abril de 2012. Em 24 de novembro de 2015 houve a revisão e atualização da REN nº 482/2012, a REN nº 687/2015. Essas regulamentações importantes que ocorreram no país a respeito da tecnologia fotovoltaica são destacadas a seguir.

### 2.3.1 Resolução Normativa Nº 414/479

A resolução nº 414 estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada, cujas disposições devem ser observadas pelas distribuidoras e consumidores. Em 03 de abril de 2012 foi criada a REN nº 479, após sugestões de diversos agentes do setor elétrico, bem como da sociedade em geral, que contribuíram para o aperfeiçoamento regulamentar. O Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) é o valor monetário unitário determinado pela ANEEL, em R\$/MWh ou em R\$/kW, utilizado para efetuar o faturamento mensal de usuários do sistema de distribuição de energia elétrica pelo uso do sistema (ANEEL, 2012).

### 2.3.1.1 Classificação dos Consumidores

Os consumidores brasileiros são classificados em grupo A, que engloba a parcela que apresentam nível de tensão acima de 2,3 kV, e grupo B, com nível tensão abaixo de 2,3 kV. De acordo com a Figura 12 tem-se os subgrupos do A e suas especificações. Já o subgrupo B está disposto de acordo com a Figura 13.

Figura 12 – Subgrupos do Grupo A – Média e Alta Tensão

A1	Para nível de tensão $\geq$ 230 kV
A2	Para nível de tensão entre 88 a 138 kV
A3	Para nível de tensão de 69 kV
A3a	Para nível de tensão entre 30 a 44 kV
A4	Para nível de tensão entre 2,3 e 25 kV
A5	Para sistema subterrâneo

Fonte: (MARTINEZ, 2017)

Figura 13 – Subgrupos do Grupo B – Baixa Tensão

B1	residencial/ residencial baixa renda
B2	rural / cooperativa rural / serviço público de irrigação
B3	não residencial nem rural
B4	iluminação pública

Fonte: (MARTINEZ, 2017)

### 2.3.1.2 Modalidades Tarifárias

Segundo a ANEEL, as modalidades tarifárias são um conjunto de tarifas aplicáveis às componentes de consumo de energia elétrica e demanda de potência ativas. A mesma considera as seguintes modalidades:

**Azul:** aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia;

**Verde:** modalidade tarifária horária verde: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência;

**Convencional Binômia:** aplicada às unidades consumidoras do grupo A caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia. Esta modalidade será extinta a partir da revisão tarifária da distribuidora;

**Convencional Monômia:** aplicada às unidades consumidoras do grupo B, caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica, independentemente das horas de utilização do dia; e

**Branca:** aplicada às unidades consumidoras do grupo B, exceto para o subgrupo B4 e para as subclasses Baixa Renda do subgrupo B1, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia.

A modalidade tarifária analisada no estudo de caso é a horária azul, aplicada às unidades consumidoras do grupo A, que possuem tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV. Essa categoria é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, assim como de tarifas diferenciadas de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia. Considera-se horário de ponta o intervalo composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, aprovado pela ANEEL para toda a área de concessão, com exceção feita aos sábados, domingos e alguns feriados. Já o horário fora de ponta é o período constituído pelo conjunto das horas diárias complementares àquelas definidas no horário de ponta (ANEEL, 2010).

A princípio pode-se julgar a tarifa azul preferível para os consumidores que apresentam uma curva de carga mais homogênea, em que seu consumo cresce de forma constante, sem apresentar picos na demanda, desse modo não é prejudicado com a penalidade de alta demanda nos horários de ponta (MARTINEZ, 2017).

### 2.3.2 Resolução Normativa Nº 482/687

Até 2012, no Brasil, a utilização da tecnologia fotovoltaica se restringia a aplicações em pequenos sistemas isolados “*off-grid*”. Em 17 de abril desse mesmo ano, entrou em vigor a resolução normativa 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que incentiva e regulamenta a geração de eletricidade com fontes renováveis de energia e com sistemas de micro e mini geração de energia conectados à rede elétrica de distribuição para consumidores brasileiros (VILLALVA, 2015).

Após identificar a necessidade de aprimoramento da resolução 482, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015, a qual revisou Resolução Normativa nº 482/2012 e a seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Essa publicação teve como objetivo a redução dos custos e do tempo para conexão de sistemas enquadrados como microgeração e minigeração, o aumento do público alvo, o detalhamento das informações contidas nas faturas e a atratividade do sistema de compensação de energia (ANEEL, 2016).

(ANEEL, 2017) define que:

“Microgeração distribuída é caracterizada por uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Por seu turno, a minigeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior de 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras

Ainda a respeito de sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa”.

### 3 SOFTWARE HOMER

Para realizar as simulações necessárias para a análise técnica e econômica da implementação da minigeração fotovoltaica, será utilizado um *software* de modelagem. Assim, serão feitas considerações teóricas e práticas a respeito da ferramenta computacional, para a melhor compreensão dos estudos de casos que serão desenvolvidos ao longo do trabalho. Com o auxílio do programa, o sistema pode ser analisado de modo rápido, seguro e sem custos excessivos.

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

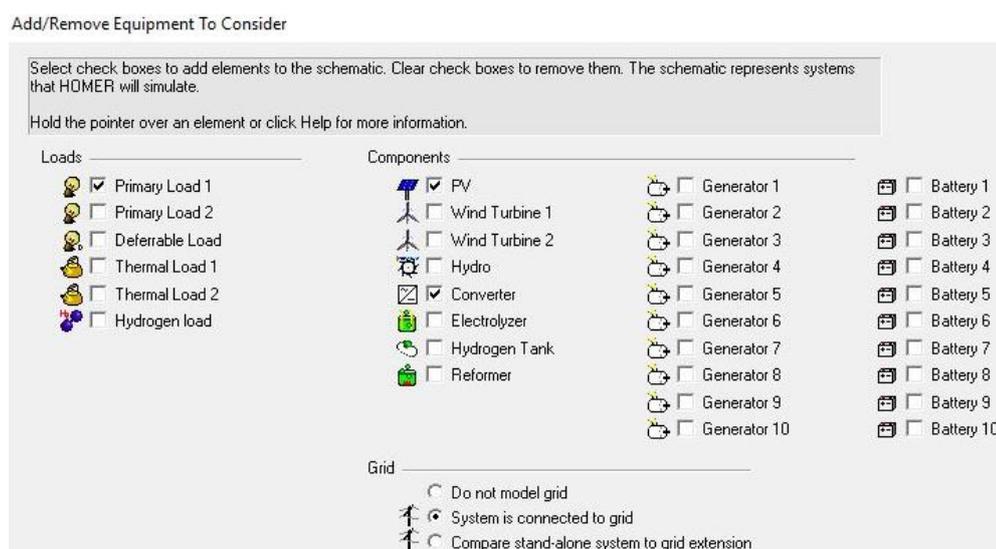
O *Software Homer (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)* foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), que pertence ao Departamento de Energia dos EUA. Seu objetivo é prever a configuração de sistemas descentralizados por meio da avaliação de alternativas em busca de resultados otimizados. O programa simula a operação do sistema, calculando o balanço energético para cada uma das 8760 horas do ano. Ainda, permite a identificação do sistema de menor custo, capaz de suprir a demanda de energia de uma determinada carga. O sistema de cálculo dos custos engloba os investimentos, a reposição dos equipamentos, combustível, operação e manutenção. Após a simulação de todas as possíveis configurações, o HOMER fornece uma lista de configurações classificadas de acordo com o custo total em valor presente (*net present cost* US\$) e do custo específico de energia (US\$/MWh) de cada sistema (ALMEIDA e FREIRE, 2008).

## 3.2 APRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DE TRABALHO

### 3.2.1 Identificação e Cadastro de Dados para Simulação

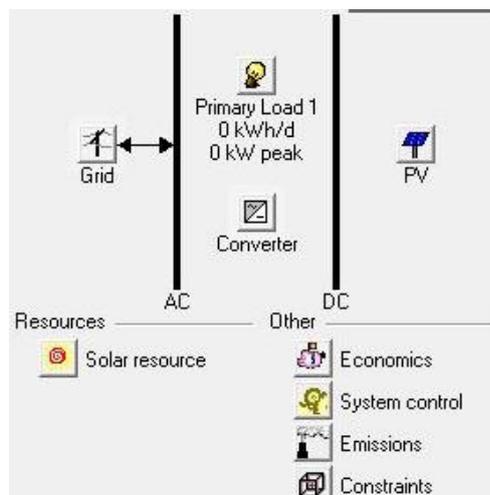
Na interface gráfica do *software*, primeiramente é necessário acrescentar os componentes utilizados na simulação, como mostra a Figura 14. Nesse caso, foi acrescentada uma carga em Loads, um sistema de painéis fotovoltaicos (PV), um conversor CC/CA (Converter) e o sistema está conectado à rede elétrica (Grid). Após confirmação da configuração, o diagrama escolhido aparece na tela inicial, como apresentado na Figura 15.

Figura 14 – Escolha de componentes no Homer



Fonte: Autora

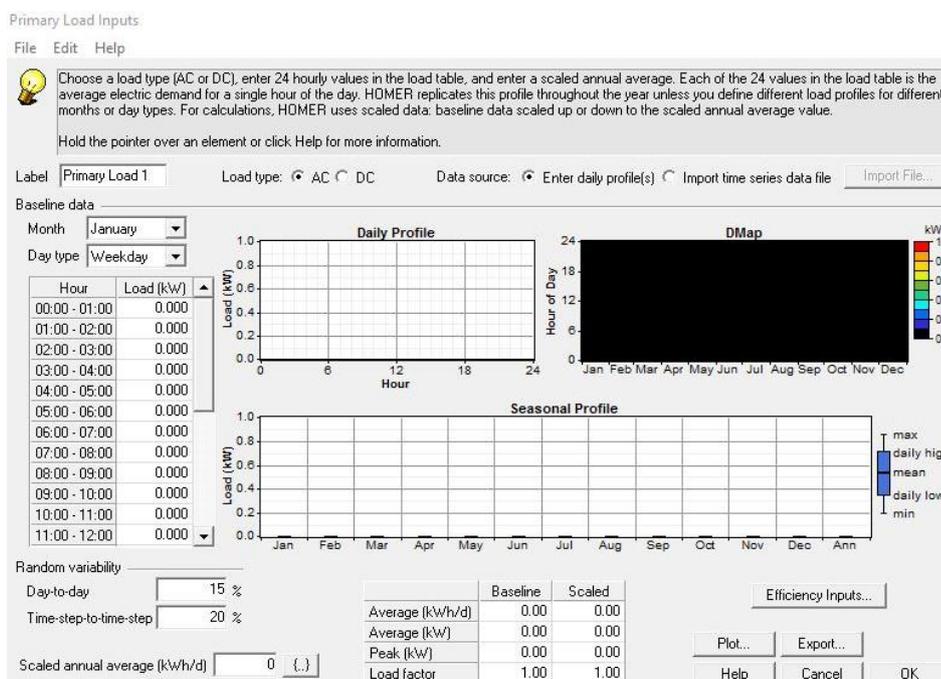
Figura 15 – Diagrama do sistema escolhido



Fonte: Autora

Para cadastrar as cargas e elaborar o perfil diário (*Daily Profile*), sazonal (*Seasonal Profile*) e de consumo mensal por hora do dia (Dmap), considera-se os meses, dias de semana e finais de semana, de acordo com a Figura 16.

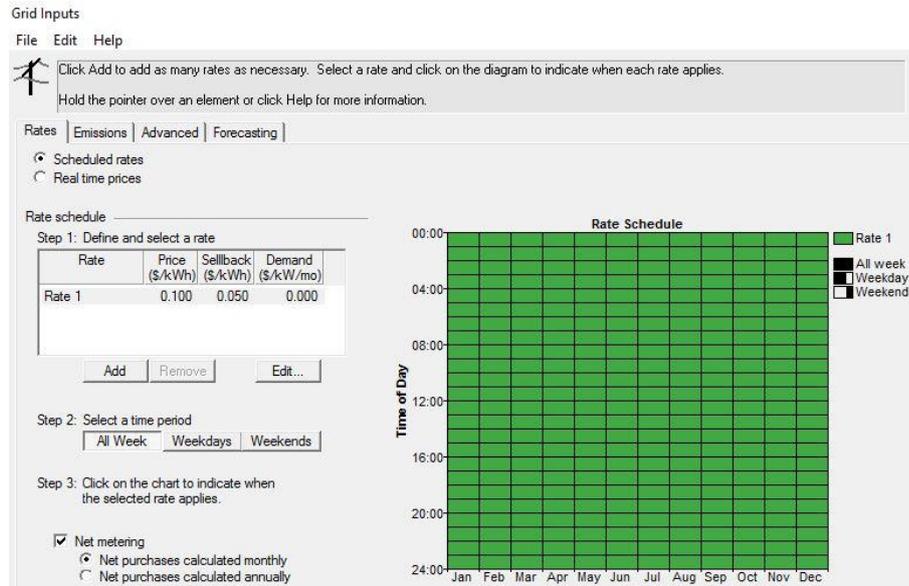
Figura 16 – Entrada de valores de carga primária



Fonte: Autora

O próximo passo consiste em fixar o preço das tarifas em dias úteis e finais de semana (*Grid Inputs*), enfatizado na Figura 17.

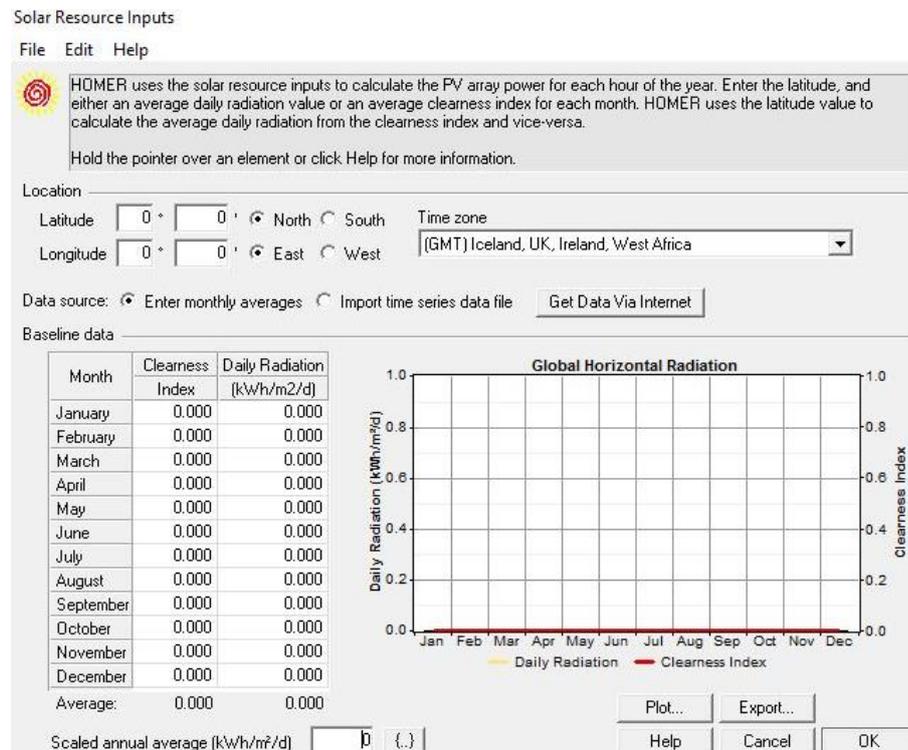
Figura 17 – Preço da energia da rede em dias úteis e finais de semana



Fonte: Autora

O Homer faz o cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território mundial, com base na latitude e longitude correspondentes ao local, ou vice-versa, o cadastro de dados se dá na opção de recurso solar (Solar Resource Inputs), visualizado na Figura 18.

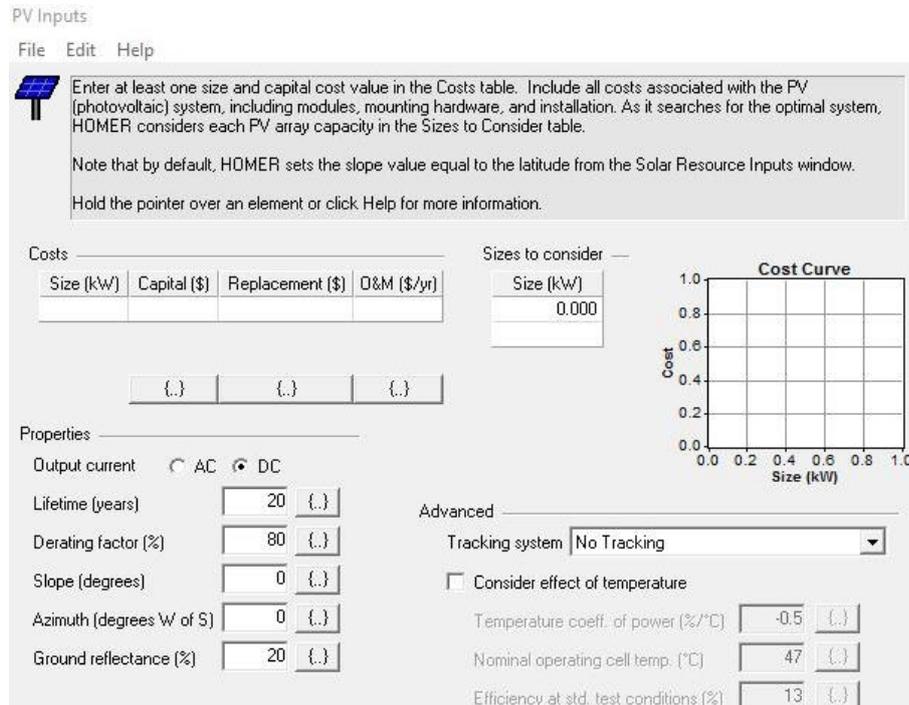
Figura 18 – Cadastro de recursos solares



Fonte: Autora

A respeito dos painéis fotovoltaicos, capital investido, potência, corrente de saída (AC ou DC), fator de depreciação, refletância do solo, vida útil e outras características são registradas no espaço PV Inputs, mostrado de acordo com a Figura 19. No espaço avançado, é possível adotar sistema de rastreamento e também há a possibilidade de considerar os efeitos da temperatura.

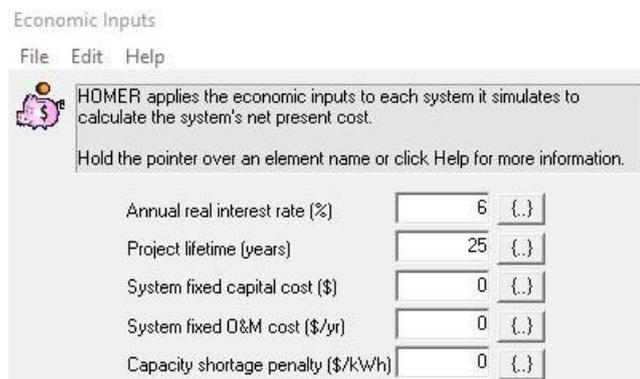
Figura 19 – Cadastro de dados sobre os painéis fotovoltaicos



Fonte: Autora

Também é possível colocar a taxa de juros real anual, o tempo de vida útil e custo de capital fixo do projeto (Economic Inputs), visualizado a partir da Figura 20.

Figura 20 – Cadastro de dados econômicos do projeto



Fonte: Autora

## 4 ESTUDO DE CASOS

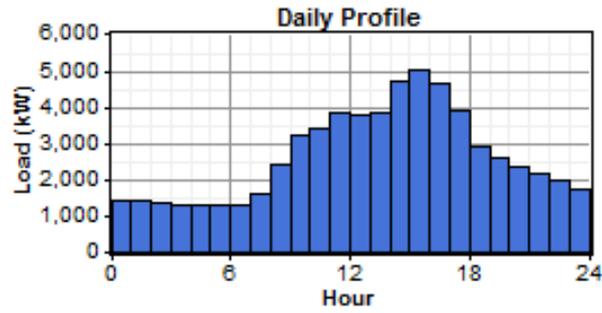
Os estudos de casos propostos foram desenvolvidos na Universidade Federal de Santa Maria, a mesma representa a unidade consumidora e está localizada na Avenida Roraima, número 1000 do bairro Camobi, situado na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Para a análise da viabilidade do projeto, é necessário efetuar levantamento de dados, custos dos equipamentos, manutenção, operação, características físicas, geográficas, bem como as condições climáticas do local. Por meio do software Homer, são realizadas simulações e estudos energéticos acerca dos cenários. Dessa forma, é possível obter resultados e comparar qual deles é mais satisfatório em questões econômicas e em termos de eficiência energética.

### 4.1 ANÁLISE DE DADOS

#### 4.1.1 Curva de carga

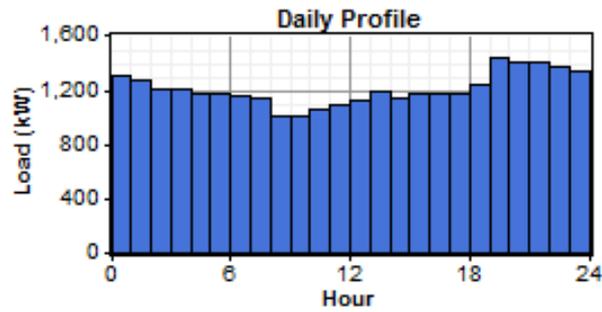
A partir de amostras reais das curvas de cargas da unidade consumidora, foram elaborados perfis diários, mensais e sazonais de consumo, com a ajuda do *software* HOMER. De acordo com a Figura 21, observa-se a curva resultante no mês de abril, com base nos dias úteis. Nesse caso, a potência chega a 5000 kW no turno da tarde e durante a noite, a mesma diminui consideravelmente, em média 1500 kW. Já a partir da Figura 22 o mês é o mesmo, contudo a referência foi em finais de semana, resultando em um comportamento gráfico diferente, uniforme ao longo do dia e da noite, em torno de 1200 kW. Quanto ao perfil sazonal, é evidenciada maior demanda em abril e dezembro, enquanto agosto apresenta a menor, de acordo com a Figura 23.

Figura 21 – Perfil da carga em dias úteis no mês de abril



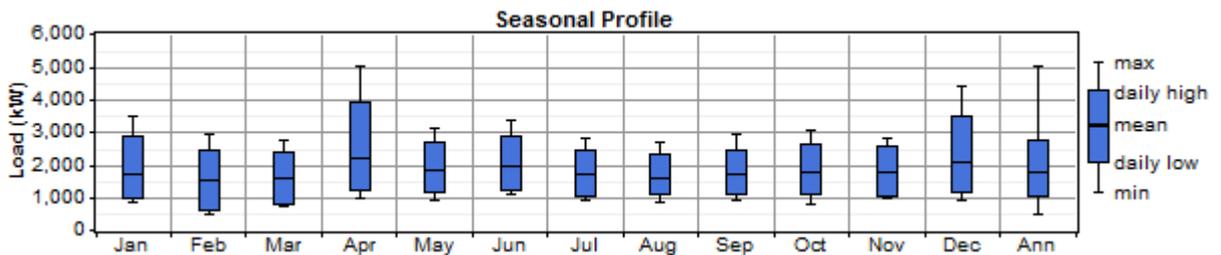
Fonte: Autora

Figura 22 – Perfil da carga em sábados, domingos e feriados



Fonte: Autora

Figura 23 – Perfil de carga sazonal



Fonte: Autora

#### 4.1.2 Tarifas de Energia da Rede Elétrica

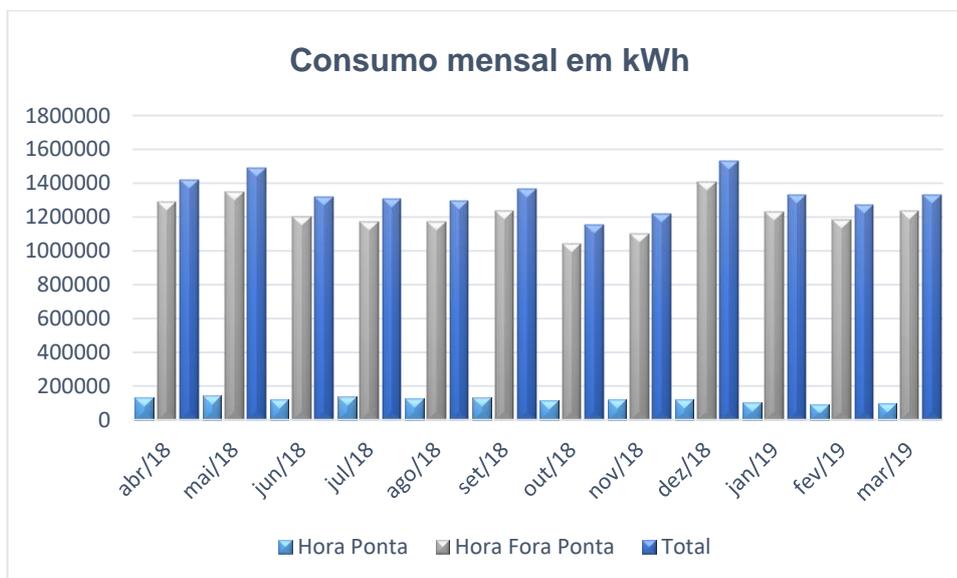
Mediante avaliação das faturas de energia da unidade consumidora, obteve-se a confirmação de dados como a classificação na tarifa Azul, grupo A4 Poder Público Federal, a demanda contratada ponta (3.000 kW) e fora ponta (5.000 kW), tal como o consumo e tarifa ANEEL. A RGE Sul distribuidora de energia S.A., uma das empresas do grupo CPFL, é a concessionária responsável pelo serviço de distribuição de eletricidade na localização. A conta de energia da Universidade Federal de Santa Maria, entre 2018 e 2019, teve custo em média R\$ 1.054.047,46 mensais. O consumo na hora da ponta e fora da ponta, além do valor total a pagar no decorrer de doze meses, estão descritos a partir da Tabela 2, enquanto que o comportamento em kWh pode ser observado a partir da Figura 24.

Tabela 2 - Consumo mensal na UFSM entre 2018 e 2019

<b>Mês/Ano</b> <b>Fatura</b>	<b>Hora Ponta</b> <b>(MWh)</b>	<b>Fora Ponta</b> <b>(MWh)</b>	<b>Total</b> <b>(MWh)</b>	<b>Total a Pagar</b> <b>(R\$)</b>
<b>Abr/18</b>	130,54	1289,62	1420,16	939.644,21
<b>Mai/18</b>	142,72	1347,47	1490,19	1.149.800,85
<b>Jun/18</b>	118,59	1202,04	1320,63	1.007.612,65
<b>Jul/18</b>	137,39	1168,50	1305,89	1.059.271,36
<b>Ago/18</b>	125,70	1169,34	1295,04	1.071.137,72
<b>Set/18</b>	132,50	1234,52	1367,02	1.120.250,64
<b>Out/18</b>	115,80	1040,23	1156,03	978.974,96
<b>Nov/18</b>	120,86	1098,03	1218,89	1.016.695,52
<b>Dez/18</b>	122,68	1407,00	1529,68	1.245.318,05
<b>Jan/19</b>	102,10	1229,09	1331,19	1.072.446,77
<b>Fev/19</b>	93,01	1179,86	1272,87	995.230,69
<b>Mar/19</b>	99,30	1233,88	1333,18	992.186,10
<b>Total</b>	1441,19	14599,58	16040,77	12.648.569,52

Fonte: Autora, baseado nas faturas

Figura 24 - Representação Gráfica do Consumo em kWh na UFSM



Fonte: Autora

A Figura 25 contempla o cadastro dos dados da rede no Homer, contendo o preço e a demanda, considerando a Tarifa Azul, no intervalo de horário na ponta, entre às 18:00 e 21:00 horas, e fora ponta.

Figura 25 – Definição de preço e demanda da rede

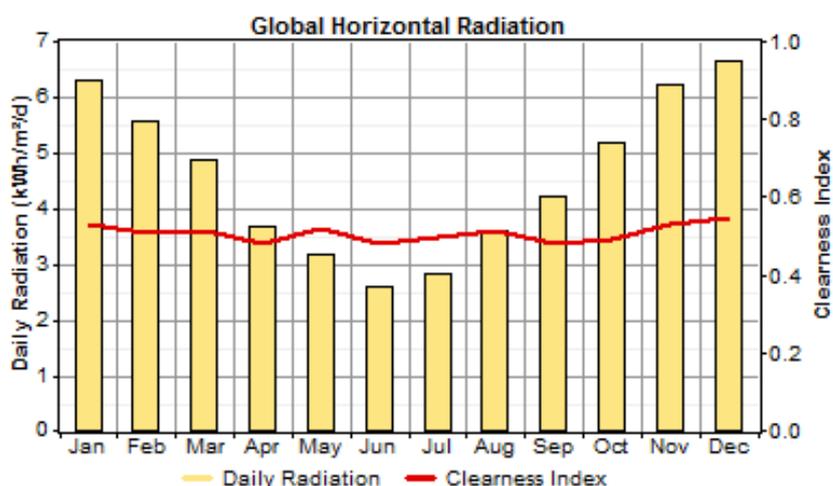


Fonte: Autora

### 4.1.3 Recurso Solar e Equipamentos Utilizados

Com base na localização geográfica do sistema fotovoltaico, obtém-se a radiação solar diária (kWh/m<sup>2</sup>/d) na região com a ajuda da ferramenta Homer. O comportamento da radiação diária, no decorrer do ano, pode ser visualizado de acordo com a Figura 26. Verificam-se os maiores valores no verão, ultrapassando 6 kWh/m<sup>2</sup> por dia. Em contrapartida, no inverno há meses que não chegam a 3 kWh/m<sup>2</sup> diários.

Figura 26 – Radiação global horizontal na cidade de Santa Maria - RS



Fonte: Autora

#### 4.1.3.1 Painel solar e Inversor

Empregou-se o painel modelo CSK-275P da marca Canadian Solar nos sistemas fotovoltaicos projetados. Suas propriedades técnicas e econômicas foram consideradas na modelagem, além da vida útil considerada 20 anos, fator de depreciação 80%, inclinação 30°, refletância do solo 20% e o valor considerado por painel foi de R\$ 624,00. Quanto ao conversor CC/CA, escolheu-se o 100TL da INGECON, considerando sua eficiência 90% no estudo, com o mesmo podendo operar em conjunto com um gerador de corrente alternada e supondo a durabilidade de 20 anos e o gasto estimado foi de R\$ 90.000,00.

## 4.2 SITUAÇÃO ATUAL COM PV DE 100 KW

### 4.2.1 Considerações Teóricas

Fontes alternativas e sustentáveis para geração de energia é um tema atual e de grande importância na questão de sustentabilidade e meio-ambiente. Além disso, permite a descentralização da geração de energia, como hidrelétricas monumentais, para uma geração distribuída, com micro centrais geradoras. Em encontro, a Universidade Federal de Santa Maria implementou um projeto ambicioso custeado pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e Rio Grande Energia RGE Sul, a construção de uma usina solar fotovoltaica, no valor de R\$ 900.000,00. O empreendimento é uma amostra de que energias renováveis e sustentáveis têm espaço no mercado energético e suprem uma demanda considerável de energia requerida diariamente, podendo ser visualizado a partir da Figura 27. O sistema em questão, por exemplo, tem uma capacidade instalada de 100kW e é capaz de fornecer energia para prédios próximos da sua localização e conta com uma central de monitoramento de eficiência energética, de onde pode ser acompanhada a geração fotovoltaica (INCT, 2018).

Figura 27 – Usina Solar na Universidade Federal de Santa Maria

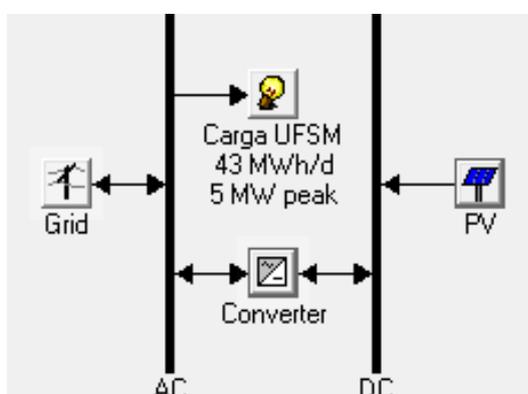


Fonte: Arquivo pessoal de Rafael C. Beltrame

## 4.2.2 Análise e Resultados

Para as simulações da situação atual de geração com capacidade instalada de 100 kW, foram utilizados os recursos analisados anteriormente. A inserção dos dados e das tecnologias foi feita no Homer, considerando os preços e as informações técnicas do projeto. A configuração do sistema consiste, basicamente, em painéis solares e conversores, alimentando uma carga conectada à rede, conforme sistema modelado e representado a partir da Figura 28.

Figura 28 – Representação da configuração do sistema no Homer



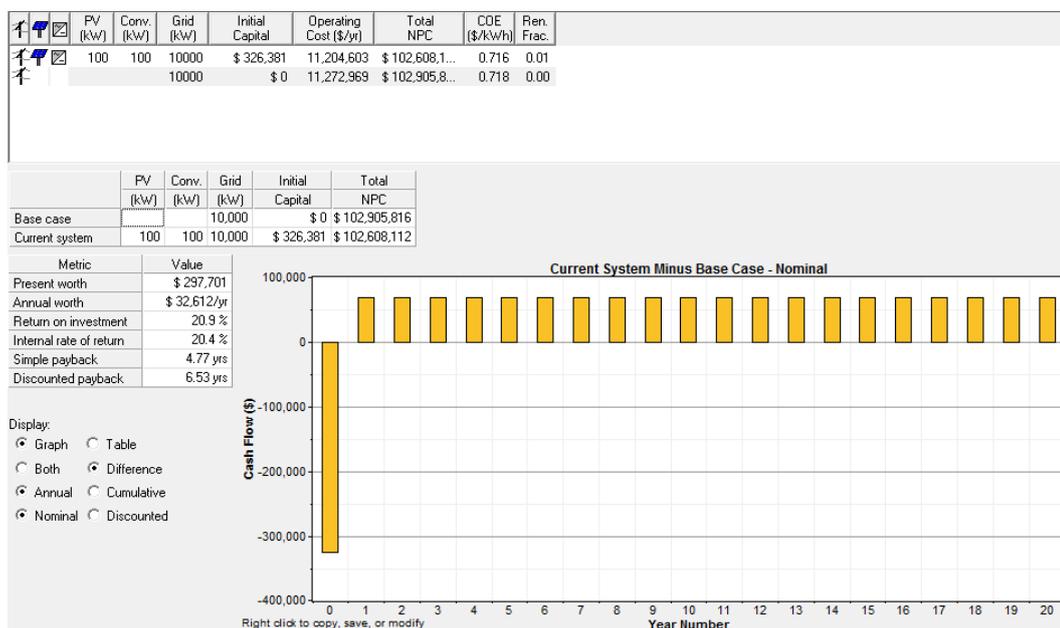
Fonte: Autora

### 4.2.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O parâmetro de avaliação econômica que será considerado neste estudo é o Valor Presente Líquido (VPL), de acordo com o qual a melhor alternativa dentre as respostas encontradas é aquela com o menor VPL. Essa variável contempla os custos de investimento inicial, operação, manutenção substituição dos componentes, tempo de vida útil do projeto e a compra de energia da concessionária.

Após a simulação do sistema fotovoltaico atual de 100 kW no Homer, comparou-se com o caso base, onde a alimentação é advinda apenas da rede. Assim, é possível observar a comparação econômica entre os casos em um horizonte de vinte anos a partir da Figura 29.

Figura 29 – Comparação econômica entre o caso atual e o caso base



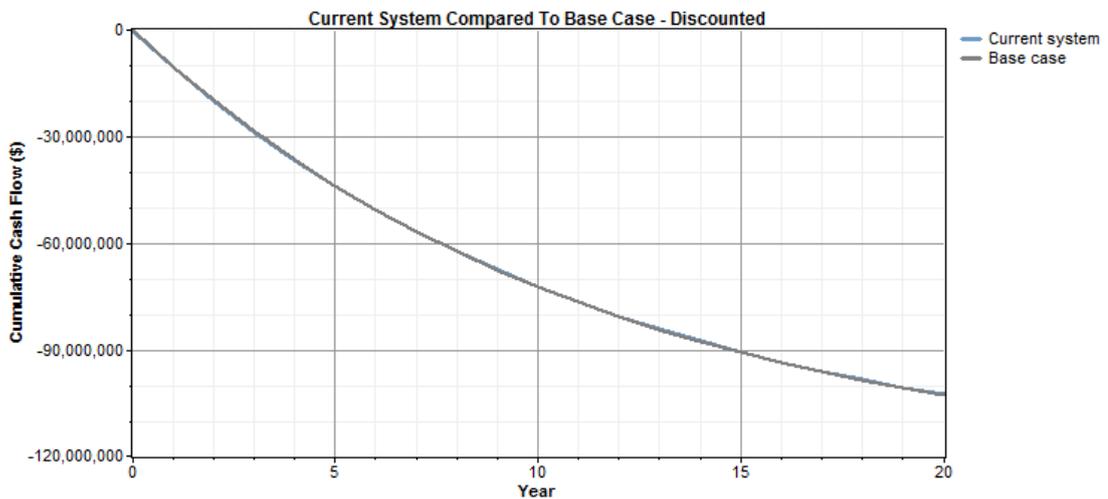
Fonte: Autora

Dessa forma, observou-se que o cenário com o menor VPL seria o atual, igual a R\$ 102.608.112,00 formado por painéis fotovoltaicos e conversor, associado ao uso da rede elétrica. O valor presente consiste no sistema atual menos o caso base (R\$ 102.905.816,00) e representa R\$ 297.701,00. Aplicando o indicador de reembolso *payback*, que mede o período de retorno do projeto, somando os valores de fluxos negativos com os positivos até que a soma resulte em zero. Ou seja, é a relação do investimento inicial com a energia injetada na rede e quanto menor for esse número, mais atrativo será o negócio. O programa retorna o *payback* simples, que inclui a inflação, e o *discounted* que desconsidera a mesma. Assim, pode-se prever que o retorno simples se dará em 4,77 anos, enquanto o outro ocorrerá em 6,53 anos. Nos cálculos, foram ponderados o capital inicial de R\$ 326.381,00 investido em painel e conversor, além do custo de operação do sistema, composto principalmente pelo serviço pago à concessionária, totalizando R\$ 11.204.603,00 por ano.

#### 4.2.2.2 Fluxo de Caixa

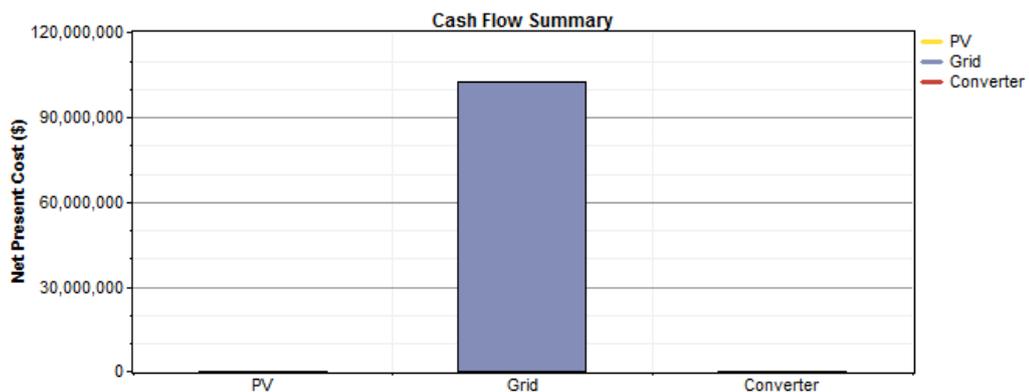
O fluxo de caixa pondera o montante aplicado, as despesas de funcionamento e o payback. A Figura 30 esboça o sistema atual comparado ao caso base (descontado) e nota-se a semelhança gráfica entre os casos ao confrontar os dados de fluxo de caixa acumulado. De acordo com a Figura 31, o custo presente líquido da rede predomina no resumo do fluxo de caixa, pois o sistema de geração é pequeno equiparado ao gasto com a distribuidora.

Figura 30 – Fluxo de caixa acumulado do caso atual x caso base



Fonte: Autora

Figura 31 – Resumo do fluxo de caixa do caso atual

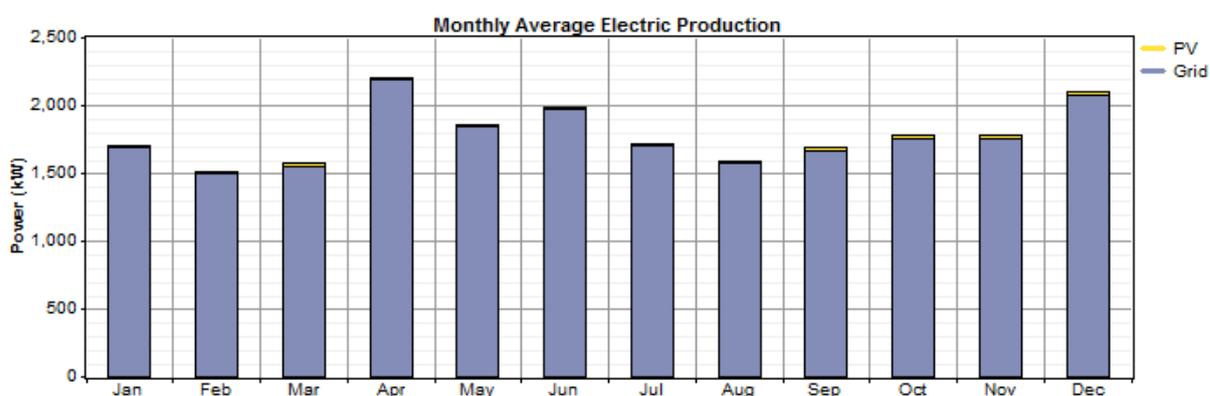


Fonte: Autora

#### 4.2.2.3 Produção de Eletricidade

Quanto à produção de energia, a fração renovável de 100 kW potência instalada gera 139.452 kW por ano, o que corresponde a 1% do consumo da UFSM. De acordo com a Figura 32, fica evidente a discrepância na quantidade média de eletricidade mensal advinda dos painéis fotovoltaicos (em amarelo) e da rede (roxo).

Figura 32 – Produção média de eletricidade por mês

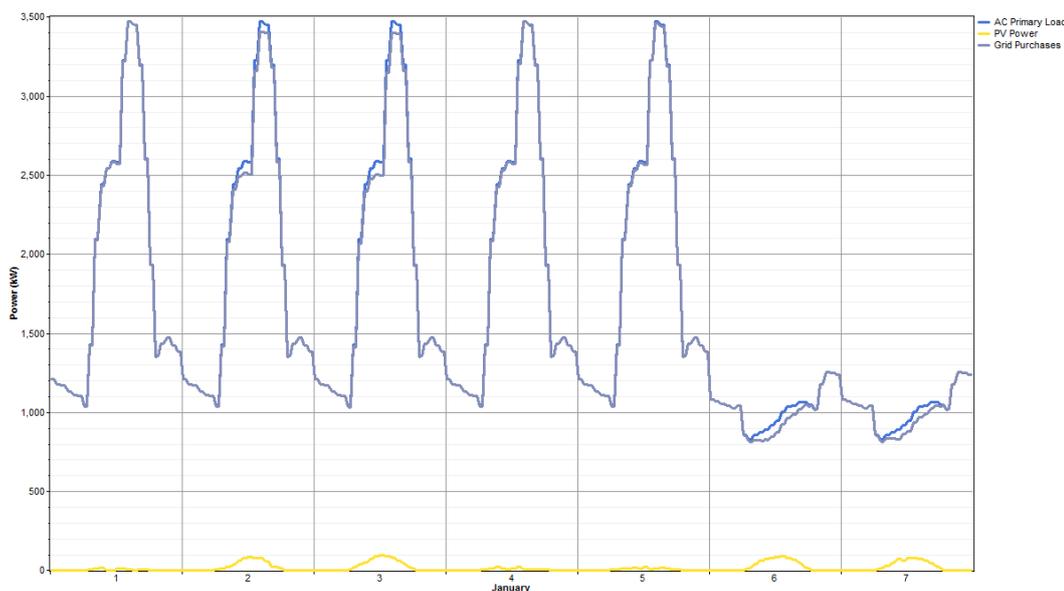


Fonte: Autora

#### 4.2.2.4 Perfil de Produção e Consumo

Para o estudo de caso atual, é feita a análise comparativa do perfil de produção fotovoltaica (na cor amarela) e a compra de energia da rede (em), em sincronismo com a carga (em azul) nos sete primeiros dias do mês de janeiro. O comportamento gráfico resultante é observado a partir da Figura 33. Logo, a potência instalada de 100 kW na minigeração é sucinta em relação ao consumo na UFSM que ultrapassa 3.400 kW durante os dias úteis.

Figura 33 – Representação gráfica PV x Rede x Carga do caso atual



Fonte: Autora

## 4.3 CASO 2 COM PV DE 5.000 KW

### 4.3.1 Considerações Teóricas

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) inaugurou a primeira usina fotovoltaica em Janaúba (MG). A demanda da nova usina fotovoltaica é composta, principalmente, pelo Mercado Central de Belo Horizonte e os empreendimentos associados à Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG). A usina contou com investimento de R\$ 18,5 milhões. A área utilizada de 230 mil m<sup>2</sup>, contendo 16 mil placas fotovoltaica e com capacidade de produção de cinco megawatts (MW), é suficiente para abastecer de cerca de 2.000 residências (SUNO, 2019).

O segundo caso proposto consiste na minigeração distribuída com capacidade instalada de 5 MW, para a mesma unidade consumidora do estudo anterior. Serão feitas análises técnicas e econômicas em uma perspectiva de vinte anos, com o auxílio do *software* Homer para obtenção de resultados.

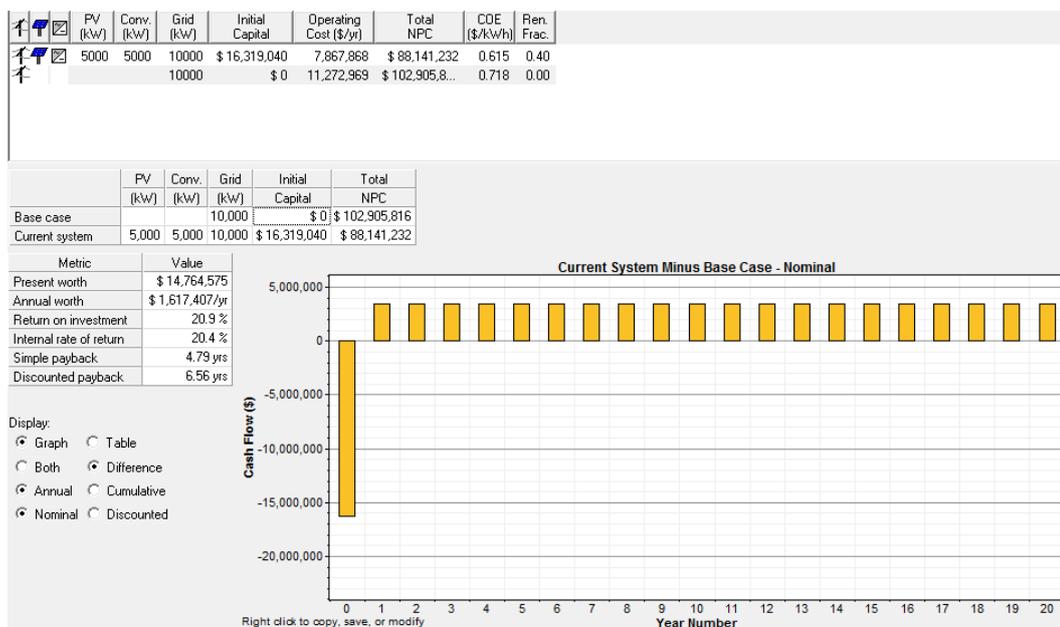
### 4.3.2 Análise e Resultados

Para a seguinte análise do estudo de caso, será considerado um sistema com configuração similar ao representado a partir da Figura 28, contudo o tamanho da usina solar será maior.

#### 4.3.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

A simulação e a comparação com o caso base foram feitas depois de modelar o sistema fotovoltaico de 5 MW no Homer de acordo com Figura 34. O VPL do caso 2 é menor, totalizando R\$ 88.141.868,00. Subtraindo do caso base (R\$ 102.905.816,00), o valor presente será igual a R\$ 14.764.575,00. O *payback* simples é previsto para 4,79 anos e o descontado 6,56 anos. Com orçamento inicial de R\$ 16.319.040,00 e custo de operação na casa dos R\$ 7.867.868,00 anuais.

Figura 34 – Comparação econômica entre o caso 2 e o caso base

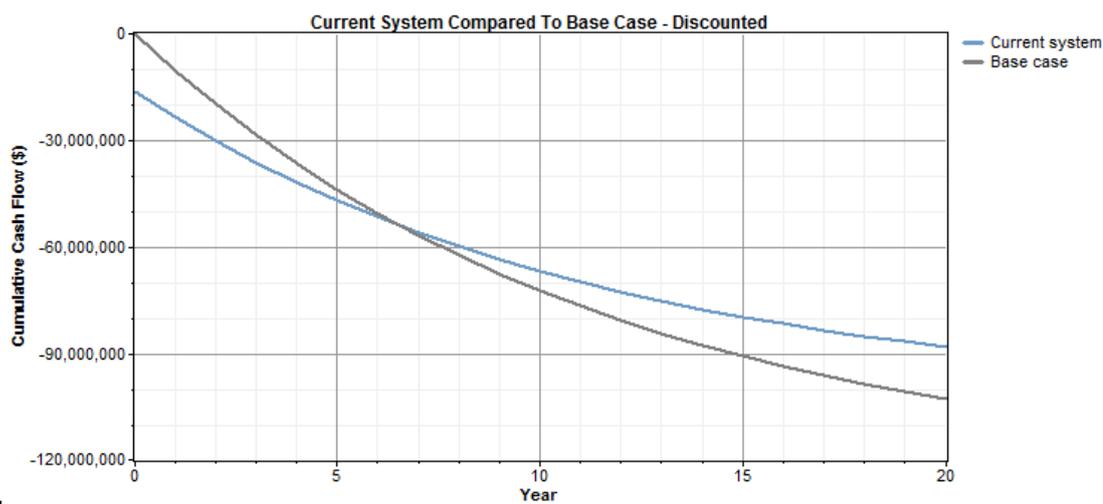


Fonte: Autora

#### 4.3.2.2 Fluxo de Caixa

Considerando as entradas e saídas do empreendimento proposto, plotou-se o gráfico referente ao fluxo de caixa acumulado do caso 2 comparado ao caso case, no período de vinte anos. A tendência pode ser visualizada a partir da Figura 35, em que inicialmente o sistema fotovoltaico é desfavorável economicamente, uma vez que os custos de sua implementação são consideráveis. Ao ultrapassar o sexto ano, as linhas convergem para o mesmo ponto, o que significa que os cenários empatam financeiramente. A partir desse momento, a minigeração passa a ser vantajosa equiparada à compra de energia proveniente exclusivamente da rede.

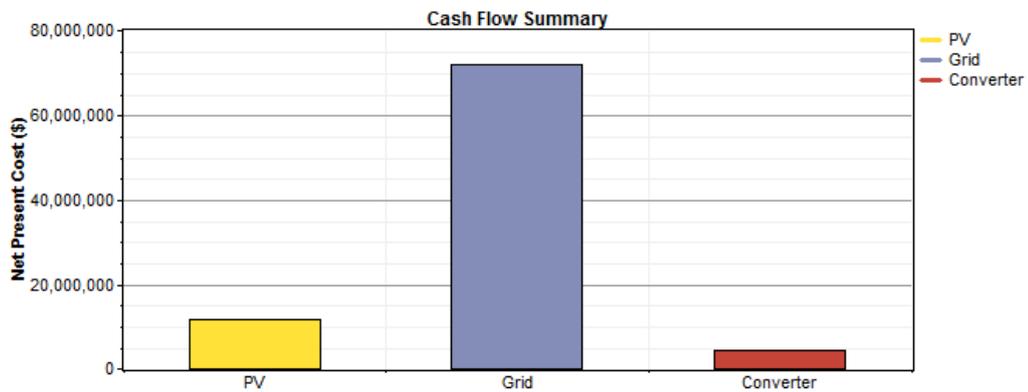
Figura 35 – Fluxo de caixa acumulado do caso 2 comparado ao caso base



Fonte: Autora

Conforme o resumo do fluxo de caixa representado a partir da Figura 36, é evidente que a maior despesa ainda está concentrada na fatura (na cor roxa), todavia a aplicação em placas fotovoltaicas (em amarelo) e conversores (vermelho) se torna significativa.

Figura 36 – Resumo do fluxo de caixa do caso 2

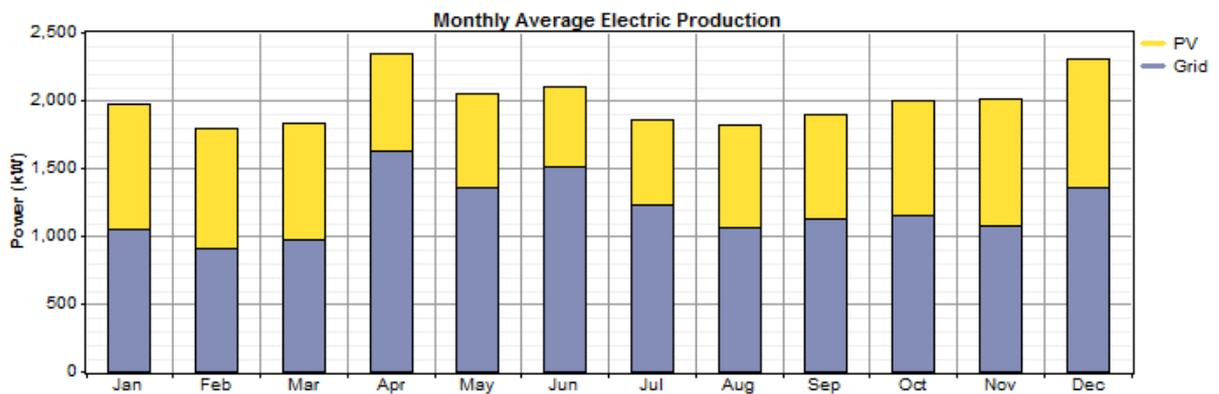


Fonte: Autora

#### 4.3.2.3 Produção de Eletricidade

Ao tratar-se da produção de eletricidade no caso 2, percebe-se a partir da Figura 37 que 40% é oriunda dos painéis fotovoltaicos, atingindo 6.972.577 kWh/ano. A outra parcela provém da distribuidora, que irá fornecer 10.547.593 kWh por ano para suprir a demanda da UFSM. Ainda, o sistema irá injetar na rede 1.123.571 kWh de energia excedente, anualmente.

Figura 37 – Produção média de eletricidade por mês

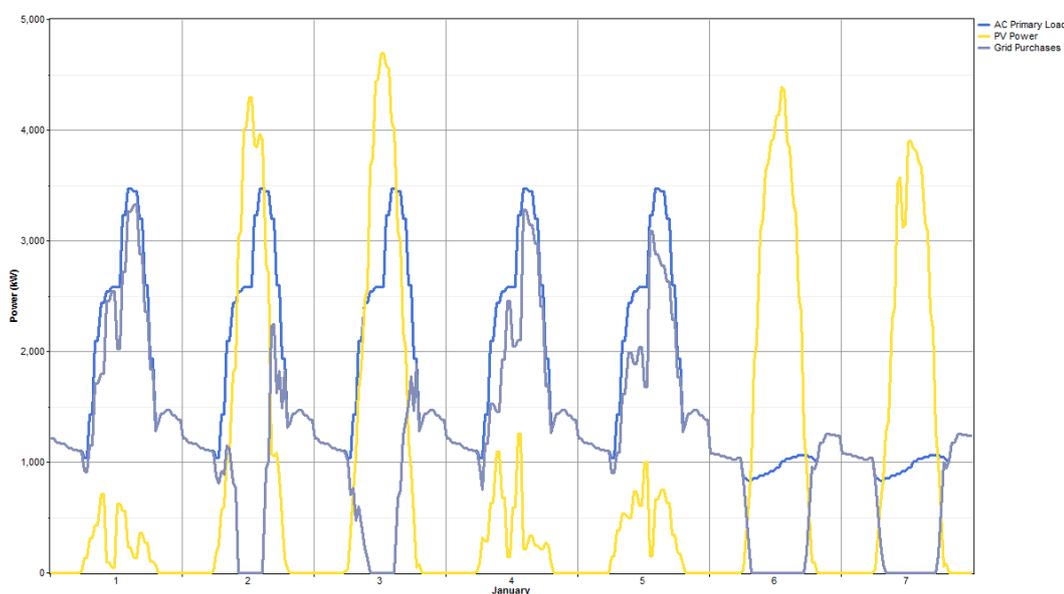


Fonte: Autora

#### 4.3.2.4 Perfil de Produção e Consumo

Comparando-se a curva de produção de energia proveniente dos raios solares, a da rede e a da carga, simultaneamente, é possível observar que em alguns dias a minigeração ultrapassa 4.000 kW, suprindo o consumo da UFSM e gerando energia excedente. A representação gráfica dos primeiros dias de janeiro pode ser conferida a partir da Figura 38. Dessa forma, a usina de 5 MW impactaria de forma significativa na unidade consumidora.

Figura 38 – Representação gráfica PV x Rede x Carga do caso 2



Fonte: Autora

## 5 CONCLUSÃO

Conforme proposto inicialmente, o objetivo deste trabalho foi analisar a implementação da minigeração fotovoltaica em uma unidade consumidora pertencente ao Grupo A4, contemplada pela tarifa azul. Quanto às motivações para o estudo, pode-se citar o aumento do consumo e das faturas de energia elétrica, além das questões de sustentabilidade e diversificação da matriz energética. Para isso, foram realizadas pesquisas sobre o cenário nacional, a configuração dos sistemas, as normas regulamentárias. Posteriormente, foi realizado o levantamento das curvas de carga e a estratificação dos dados. Assim, com o auxílio de uma ferramenta computacional confiável, foi possível fazer a modelagem dos casos para a obtenção dos resultados.

Primeiramente, foi descoberto o perfil da curva de carga da Universidade Federal de Santa Maria e em um segundo momento observou-se que a maior potência se concentra durante o dia e fora da ponta. Esse fato vai ao encontro dos horários de alta radiação solar e conseqüentemente, de maior geração de energia fotovoltaica. O mesmo acontece com o perfil sazonal, no verão foram observadas as maiores demandas. Por exemplo, em janeiro de 2019 a fatura da UFSM chegou a custar R\$ 1.072.446,77, mês em que a radiação solar diária alcançou 6 kWh/m<sup>2</sup>. Diante desse contexto, pode-se afirmar que o cenário é favorável ao método de produção.

A partir das simulações efetuadas no Homer, constatou-se a viabilidade técnica e econômica dos projetos. No primeiro caso, a potência instalada pode ser julgada pequena comparada à carga a ser alimentada, visto que atenderá apenas 1% do consumo anual da universidade. Porém, nota-se economia ao longo dos meses, visto que o caso atual, com potência instalada de 100 kW, apresenta menor valor presente líquido que o caso base, que consiste na obtenção de eletricidade exclusivamente da rede. O tempo de retorno do investimento é um fator importante e, em ambos os casos, se dará de quatro a sete anos, prazo considerado bom para a aplicação. A diferença do segundo caso, é que a usina de 5.000 kW teria capacidade para abastecer 40% da demanda por ano, ou seja, o sistema supriria quase metade da energia necessária para manter o campus em funcionamento. Além disso, esse sistema robusto seria capaz de gerar excedente, que pode ser injetado na rede, tornando o empreendimento ainda mais atrativo.

Portanto, pode-se concluir que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são realidade no Brasil, e tanto o caso atual quanto o caso 2, são viáveis e vantajosos economicamente e ambientalmente. A geração com os painéis solares reduz consideravelmente os custos da instituição nas faturas e esse dinheiro pode ser investido em outras áreas. Os incentivos dos órgãos públicos, a promulgação de regulações específicas voltadas para o setor e a queda no preço dos equipamentos utilizados na geração, acarretam no crescimento da procura pela fonte alternativa de produção de energia.

Por fim, é pertinente dizer que o presente trabalho atingiu os objetivos propostos, gerando conhecimentos a respeito de geração distribuída, micro e minigeração fotovoltaica e a análise técnica e econômica de projetos. Para trabalhos futuros, pode ser feita a inserção de outras fontes de geração de energia elétrica, como a biomassa e a eólica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. C. A. D.; FREIRE, R. L. **Geração de Energia Elétrica através de um Sistema Híbrido Diesel-Eólico para um Hospital**. 2008. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural (AGRENER GD).

ANEEL, A. N. D. E. E. **Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010**. Brasília 2010.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 479, de 3 de Abril de 2012**. Brasília 2012.

\_\_\_\_\_. Geração Distribuída. Brasília, 2015. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> >. Acesso em: 04/04/2019.

\_\_\_\_\_. **Micro e minigeração distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA 2016.

\_\_\_\_\_. **Perguntas e Respostas Sobre a Aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012**. Brasília 2017.

BAHIA, E. E. Pirapora, a mais poderosa estação de energia solar da América Latina. Bahia, 2018. Disponível em: < <https://energiaeolicabahia.blogspot.com/2018/01/pirapora-mais-poderosa-estacao-de.html> >. Acesso em: 28/03/2019.

BERNARDON, D. P. et al. **SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO NO CONTEXTO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES - UMA ABORDAGEM PARA RECONFIGURAÇÃO DE REDES**. 1ª. AGEPOC, 2015. 163.

CRESESB. Energia Solar Fotovoltaica. 2008. Disponível em: < [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=321](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321) >. Acesso em: 02/05/2019.

EPE, E. D. P. E. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro 2018a.

\_\_\_\_\_. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050. 2018b. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20Elétrica.pdf> >. Acesso em: 23/04/2019.

INCT, I. N. D. C. E. T. Usina Solar é inaugurada na UFSM. Santa Maria, RS, 2018. Disponível em: < <http://inctgd.ufsm.br/index.php/pt-br/noticias/146-usina-solar-e-inaugurada-na-ufsm> >. Acesso em: 19/04/2019.

MARTINEZ, G. C. **VERIFICAÇÃO DE ENQUADRAMENTO TARIFÁRIO DE CLIENTES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO CATIVOS DE UMA DISTRIBUIDORA VIA SIMULAÇÃO**. 2017. 43 DEPARTAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2006. Disponível em: < [http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf) >. Acesso em: 15/03/2019.

ROSSI, G. 5 Conceitos Básicos Sobre Energia Solar Que Todos Deveriam Saber. New Present Energia Solar, 2018. Disponível em: < <https://npenergiasolar.com.br/conteudo-exclusivo/energia-solar-basica/> >. Acesso em: 01/02/2019.

RÜTHER, R. CONTRIBUIÇÕES À AUDIÊNCIA PÚBLICA 001/2019 ANEEL. 2019. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/audiencias-publicas> >. Acesso em: 13/05/2019.

SOLAR, P. USINA SOLAR. 2017. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html> >. Acesso em: 08/03/2019.

\_\_\_\_\_. Bateria Solar. 2018. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/bateria-solar.html> >. Acesso em: 09/03/2019.

SUNO. CEMIG inaugura usina fotovoltaica de minigeração. 2019. Disponível em: < <https://www.sunoresearch.com.br/noticias/cemig-usina-fotovoltaica-minigeracao/> >. Acesso em: 02/06/2019.

UFSM, U. F. D. S. M.-. Reitoria apresenta dados sobre o orçamento 2019 em coletiva à imprensa. 2019. Disponível em: < <https://www.ufsm.br/2019/01/23/reitoria-apresenta-dados-sobre-o-orcamento-2019-em-coletiva-a-imprensa/> >. Acesso em: 19/04/2019.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e aplicações**. 2. São Paulo: 2015. 224.