



**UNIFACS**  
UNIVERSIDADE SALVADOR  
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES\*

**MESTRADO EM ENERGIA**

**DIEGO SANTOS OLIVEIRA**

**MICRO REDES DE GERAÇÃO HÍBRIDA PARA ATENDIMENTO A COMUNIDADES  
ISOLADAS**

Salvador  
2020

**DIEGO SANTOS OLIVEIRA**

**MICRO REDES DE GERAÇÃO HÍBRIDA PARA ATENDIMENTO A COMUNIDADES  
ISOLADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Salvador UNIFACS, Laureate International Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Eudemário Souza de Santana.

Salvador  
2020

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities.

Oliveira, Diego Santos

Micro redes de geração híbrida para atendimento a comunidades isoladas.  
/ Diego Santos Oliveira. – Salvador, 2020.

109 f.: il.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia – Mestrado em Energia da Universidade Salvador, Laureate International Universities, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Eudemário Souza de Santana.

1. Energia elétrica. 2. Micro redes isoladas. 3. Modelagem e simulação.  
4. Banco de baterias. I. Santana, Eudemário Souza de, orient. II. Título.

CDD:621.3

## RESUMO

Nesta dissertação são apresentados e analisados os resultados obtidos via simulação computacional de micro redes que empregam somente fontes de energia renováveis, descartando o uso de grupos geradores com motor a combustão. As principais referências sobre o tema sugerem que um gerador elétrico acionado por motor a combustão, comumente a diesel, seja empregado como principal fonte de potência elétrica, sendo este grupo gerador a referência de frequência aos demais geradores da micro rede. No presente trabalho foram investigadas duas topologias de micro redes, ambas com armazenamento de energia em baterias: uma somente com geração fotovoltaica e outra com gerações eólica e fotovoltaica. O trabalho se deu com o desenvolvimento de um modelo cujas equações foram implementadas no aplicativo Simulink do *software* MATLAB. O modelo desenvolvido e simulado foi validado através de comparação com dados de uma usina fotovoltaica instalada na cidade de Curitiba-PR, posteriormente foram conduzidas simulações com dados da cidade de Jandaíra-BA. A análise dos resultados mostrou que é possível, com o uso do modelo e das ferramentas computacionais criadas, dimensionar uma micro rede que viabilize autonomia energética para comunidades isoladas de todo o país, uma vez que dados de outras localidades podem ser empregados.

**Palavras-chave:** Micro redes isoladas. Modelagem e simulação. Banco de baterias.

## ABSTRACT

In this dissertation, the results obtained through stand-alone micro grids computer simulation that use only renewable energy sources are presented and analyzed, discarding the use of combustion engine generator sets. The main references on the topic suggest that an electric generator driven by a combustion engine, commonly diesel, is used as the main source of electrical power, with this generator group being the frequency reference to the other micro network generators. In the present work, two micro grid topologies were investigated, both with energy storage in batteries: one with only photovoltaic generation and the other with wind and photovoltaic generations. The work was carried out by developing a model whose equations were implemented in the Simulink application of the MATLAB software. The model developed and simulated was validated by comparison with data from a photovoltaic plant installed in the city of Curitiba-PR, later simulations were conducted with data from the city of Jandaíra-BA. The analysis results showed that it is possible, with the use of the developed model and the computational tools created, to scale a stand-alone micro grid that allows energy autonomy for isolated communities around the country, since data from other locations can be used.

**Keywords:** Stand-alone micro grids. Modeling and simulation. Battery systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Queda no tempo de vida útil das baterias.....	30
Figura 2 - Arquitetura de micro rede.....	34
Figura 3 - Estrutura da micro rede.....	36
Figura 4 - Topologia de rede investigada .....	38
Figura 5 - Modelo Simplificado .....	41
Figura 6 - Visão geral da micro rede em ambiente MATLAB .....	43
Figura 7 - Potência gerada e consumida.....	45
Figura 8 - Parametrização do gerador fotovoltaico.....	47
Figura 9 - Arranjo de geração fotovoltaica .....	48
Figura 10 - Fonte de corrente controlada por fasor .....	49
Figura 11 - Curva característica de geradores eólicos .....	50
Figura 12 - Variáveis do aerogerador SX3300 no Workspace .....	51
Figura 13 - Bloco Lookup Table do aerogerador SX3300 .....	52
Figura 14 - Função de geração eólica.....	53
Figura 15 - Parametrização da geração eólica.....	53
Figura 16 - Fonte de corrente da geração eólica.....	54
Figura 17 - Parametrização do banco de baterias.....	55
Figura 18 - Controle do banco de baterias .....	58
Figura 19 - Fonte de corrente do banco de baterias .....	60
Figura 20 - Gerador de referência senoidal.....	60
Figura 21 - Parametrização de carga residencial .....	61
Figura 22 - Perfil de consumo residencial típico.....	62
Figura 23 - Controle da carga 1.....	63
Figura 24 - Diagrama da geração fotovoltaica.....	64
Figura 25 - Diagrama da geração eólica sem CEP .....	64

Figura 26 - Diagrama da geração eólica com CEP .....	64
Figura 27 - Diagrama elétrico de gerador fotovoltaico residencial.....	68
Figura 28 - Curvas de eficiência CEP .....	69
Figura 29 - Energia gerada entre agosto/18 a agosto/19 .....	69
Figura 30 - Geração fotovoltaica ago-18 a jul-19 .....	70
Figura 31 - Micro rede aplicada aos cenários.....	71
Figura 32 - Irradiação solar dos dias típicos mensais .....	72
Figura 33 - Velocidade do vento nos dias típicos .....	73
Figura 34 - Importação de dados ambientais para o MATLAB.....	74
Figura 35 - Configuração do bloco <i>Lookup Table</i> com dados de irradiação solar.....	74
Figura 36 - Edição de uma <i>Lookup Table</i> .....	75
Figura 37 - Parametrização da parada para manutenção .....	76
Figura 38 - Parametrização da geração fotovoltaica do cenário 1 .....	77
Figura 39 - Parametrização do banco de baterias cenário 1 .....	78
Figura 40 - Parametrização das cargas .....	78
Figura 41 - Potência total gerada e consumida FV+BAT no cenário 1.....	80
Figura 42 - Estado de Carga das Baterias cenário 1.....	80
Figura 43 - Desempenho das baterias cenário 1.....	81
Figura 44 - Geração fotovoltaica da micro rede híbrida do cenário 2.....	82
Figura 45 - Gerador eólico do cenário 2.....	83
Figura 46 - Curva Característica do aerogerador EcoSolar 1K.....	83
Figura 47 - Potência total gerada FV+EOL+BAT no cenário 2.....	84
Figura 48 - Desempenho do banco de baterias no cenário 2.....	85
Figura 49 - Estado de carga das baterias no cenário 2.....	85
Figura 50 - Potência total gerada FV+BAT no cenário 3.....	86
Figura 51 - Desempenho do banco de baterias no cenário 3.....	87
Figura 52 - Estado de carga do banco de baterias no cenário 3.....	88

Figura 53 - Potência total gerada FV+EOL+BAT no cenário 4.....	89
Figura 54 - Desempenho do banco de baterias no cenário 4.....	90
Figura 55 - Estado de carga das baterias no cenário 4.....	90
Figura 56 - Geração fotovoltaica do cenário 5.....	91
Figura 57 - Potência total gerada FV+BAT no cenário 5.....	92
Figura 58 - Desempenho do banco de baterias no cenário 5.....	92
Figura 59 - Estado de carga das baterias no cenário 5.....	93
Figura 60 - Geração eólica do cenário 6.....	94
Figura 61 - Geração fotovoltaica do cenário 6.....	94
Figura 62 - Potência total gerada FV+EOL+BAT no cenário 6.....	95
Figura 63 - Desempenho do banco de baterias no cenário 6.....	96
Figura 64 - Estado de carga das baterias no cenário 6.....	96



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fabricantes de painéis fotovoltaicos .....	29
Tabela 2 - Fabricantes de controladores de carga .....	29
Tabela 3 - Fabricantes de geradores eólicos .....	30
Tabela 4 - Fabricantes de baterias.....	31
Tabela 5 - Fabricantes de CEP .....	31
Tabela 6 - Dimensionamento otimizado .....	35
Tabela 7 - Dados de curva característica do aerogerador SX330.....	51
Tabela 8 - Geração mensal do CEP ABB entre agosto/18 a agosto/19 .....	69
Tabela 9 - Geração em kWh simulada entre agosto/18 a agosto/19.....	70
Tabela 10 - Diferença entre geração real e simulada entre agosto/18 a agosto/19 ..	70
Tabela 11 - Comparativo entre os cenários de geração.....	98

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Alternating Current
CEP	Conversores Eletrônicos de Potência
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico
CO2	Dióxido de Carbono
DC	Direct Current
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LI-ION	Ion de Lítio
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	Maximum Power Point Tracker
OFF-GRID	Sistema Desconectado da Rede de Distribuição de Convencional
ON-GRID	Sistema Conectado à Rede de Distribuição de Convencional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PWM	Pulse Width Modulation
SIN	Sistema Interligado Nacional
STRING	Interligação elétrica entre painéis fotovoltaicos
UPS	Uninterruptible Power Source

## SUMÁRIO

<b>1 APRESENTAÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 HIPÓTESES .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 <b>Geral</b> .....	15
1.2.2 <b>Específicos</b> .....	15
1.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
1.4 JUSTIFICATIVA.....	17
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	18
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1.1 <b>Geradores fotovoltaicos</b> .....	22
2.1.2 <b>Geradores eólicos</b> .....	23
2.1.3 <b>Controladores de carga</b> .....	24
2.1.4 <b>Acumuladores</b> .....	25
2.1.5 <b>Conversores eletrônicos de potência</b> .....	25
2.1.6 <b>Software de simulação</b> .....	27
2.2 EQUIPAMENTOS.....	29
2.3 MICRO REDES DE GERAÇÃO.....	32
2.3.1 <b>Topologia investigada</b> .....	38
2.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	39
<b>3 MICRO REDE INVESTIGADA</b> .....	<b>40</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA MICRO REDE.....	40
3.1.1 <b>Integração com simulação em MATLAB</b> .....	42
3.2 GERADORES.....	45
3.2.1 <b>Geração fotovoltaica</b> .....	45
3.2.2 <b>Geração Eólica</b> .....	49
3.3 ACUMULADORES DE ENERGIA .....	54
3.4 CARGAS .....	61
3.5 INTEGRAÇÃO PARA FORMAÇÃO DA MICRO REDE.....	63
3.6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	66
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>67</b>

4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	67
4.2	SIMULAÇÃO EM CENÁRIOS .....	71
4.2.1	Parametrização básica do ambiente de simulação.....	72
4.2.2	Cenário 1: geração fotovoltaica em dias típicos .....	77
4.2.3	Cenário 2: geração fotovoltaica e eólica em dias típicos.....	82
4.2.4	Cenário 3: geração fotovoltaica em 1 ano .....	86
4.2.5	Cenário 4: geração fotovoltaica e eólica em 1 ano .....	88
4.2.6	Cenário 5: geração fotovoltaica revisada em 1 ano.....	91
4.2.7	Cenário 6: geração fotovoltaica e eólica revisadas em 1 ano.....	93
4.3	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS.....	97
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>100</b>
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	102
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>103</b>

## 1 APRESENTAÇÃO

O sistema elétrico brasileiro se destaca mundialmente pela alta participação de fontes renováveis: 64,9 % da energia elétrica brasileira é produzida em hidrelétricas, 8,4 % em usinas movidas por biomassa, 8,6 % eólica e 1 % solar (EPE, 2020). As usinas de geração estão espalhadas pelo território, compondo um sistema integrado de geração, transmissão e distribuição.

O Sistema Interligado Nacional (SIN) atende a 99 % dos sistemas elétricos em funcionamento no país, sendo o restante atendido por sistemas isolados. Desde 2017, o planejamento da operação e previsão de carga dos demais sistemas isolados foi atribuída ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Atualmente existem 235 localidades isoladas em operação, representando 1 % restante do consumo total do país. Tais localidades são supridas, principalmente, por usinas de geração térmica movidas a óleo diesel (ONS, 2020).

Nas projeções divulgadas por IBGE (2019), 99,7 % da população do país tem acesso à energia elétrica. Considerando que a população total é de aproximadamente 211 milhões (IBGE, 2020), são cerca de 630 mil pessoas que não contam com energia elétrica em suas casas. Nas regiões norte e nordeste são 377 mil pessoas sem o serviço de fornecimento de energia elétrica residencial.

O Brasil tem características geográficas desafiadoras, sob o ponto de vista de área de cobertura do sistema de distribuição. O fornecimento de energia elétrica a localidades distantes contradiz o interesse das concessionárias, uma vez que as distâncias envolvidas e a baixa densidade de consumidores representam pouca oportunidade de retorno financeiro, ao considerar dificuldades relacionadas a extensão da rede existente e compensação por eventuais impactos ambientais.

A eletrificação rural e de áreas afastadas geograficamente tem maior custo associado devido à infraestrutura necessária para transmissão e distribuição, além de custos com manutenção associados ao pequeno retorno financeiro devido à baixa densidade de cargas (MAHAPATRA; DASAPPA, 2012).

O uso de sistemas de suprimento descentralizado tem se mostrado viável em vários estudos (KUMAR et al. 2017), (BEHERA et. al, 2017), (GUERRERO et al. 2009), (RIBEIRO et al., 2010), ao comparar com os custos iniciais de expansão da rede de distribuição convencional. De fato, em comunidades com baixa demanda, a implantação

de micro redes isoladas podem ser mais viáveis economicamente que a extensão da rede existente.

Em essência, a micro rede é constituída de uma combinação de fontes de energia, cargas e dispositivos eletrônicos responsáveis pelo controle da potência na rede e esta rede é isolada da rede de distribuição convencional (ARULAMPALAM et al., 2004).

Os autores Smith et al. (2015) expandem o conceito de comunidades isoladas geograficamente, incluindo situações em que as localidades são isoladas eletricamente, ou seja, podem estar próximas fisicamente da rede elétrica convencional, porém não têm acesso ao fornecimento de energia elétrica por dificuldades de se interligarem à rede de distribuição existente.

A tecnologia aplicada às micro redes tem sido aprimorada continuamente, especialmente em países caracterizados por população dispersada pelo território, dependente de atividades rurais e regiões de baixo desenvolvimento econômico (RÍO; BURGUILLO, 2009). Os autores Hasan et. al. (2019) apresentam um estudo sobre o estado da arte na utilização de sistemas de geração híbrida associados a sistemas de armazenamento, no qual relacionam possíveis deficiências nas micro redes que não contam com geração a combustão e as alternativas técnicas existentes, tais como: equipamentos de conversão associados a filtros; gerenciamento das fontes fotovoltaica e eólica visando reduzir capacidade total do sistema de armazenamento e utilização de algoritmos de controle e gestão da geração e do consumo de energia.

No Brasil existe um exemplo de aplicação de micro redes com sucesso (RIBEIRO et al., 2010). Porém trata-se de um caso específico fruto de uma parceria pontual para atender um caso específico, entre o Ministério de Minas e Energia (MME) e a UFMA (Universidade Federal do Maranhão). Apesar da criação de programas de ampliação à energia elétrica pelo governo federal (MME, 2017), existe carência de estudos sobre a aplicabilidade de micro redes e a ampliação de sua utilização para o atendimento às comunidades que não têm acesso a energia elétrica, em todas as regiões do país.

Neste estudo é discutida a utilização de micro redes para fornecer energia elétrica para comunidades isoladas da rede de distribuição convencional, integrando geração centrada nos recursos energéticos disponíveis localmente. É investigada a aplicação de uma micro rede de geração híbrida, focada em fontes energéticas renováveis, capaz de ser replicada e implementada nas diversas regiões brasileiras com necessidade de expansão do fornecimento de energia a toda a população.

## 1.1 HIPÓTESES

É possível fornecer energia elétrica para comunidades isoladas utilizando fontes de energia renováveis, sem a presença de geradores a combustão.

É possível projetar e dimensionar uma micro rede de geração híbrida que atenda todas as necessidades energéticas de comunidades isoladas.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Desenvolver ferramenta de simulação computacional para avaliar a aplicação de micro redes de geração híbrida como alternativa de fornecimento de energia elétrica às comunidades isoladas, utilizando as fontes primárias eólica e fotovoltaica integradas à sistema de armazenamento de energia em acumuladores.

### 1.2.2 Específicos

- Selecionar topologia de rede isolada com possibilidade técnica de implementação, baseada em geração, distribuição e consumo sem a presença de geradores à combustão;
- Realizar estudo de caso para teste e validação da ferramenta de simulação desenvolvida através de comparação entre os resultados de simulação e dados reais provenientes de um sistema de geração fotovoltaica real instalado na cidade de Curitiba-PR;
- Realizar análise da micro rede em investigação considerando o balanço de potência e requisitos de segurança energética aplicados a cenários hipotéticos criados com dados ambientais da posição geográfica do município de Jandaíra-BA.

## 1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação iniciou com a etapa de pesquisa bibliográfica de trabalhos acadêmicos (dissertações de mestrado e teses de doutorado) e artigos técnicos científicos que viabilizassem o entendimento do estado da arte no campo de

equipamentos aplicáveis, topologias de rede disponíveis e conceitos relacionados ao emprego de micro redes de geração e consumo.

Utilizando dados de equipamentos comercialmente disponíveis, foi investigada a viabilidade técnica de implementação de sistema de geração híbrida, sem a presença de geradores a combustão através de modelagem e simulação conduzidas na ferramenta *Simulink*, do software MATLAB.

Tal ferramenta é direcionada à simulação de sistemas dinâmicos, entre eles os sistemas elétricos, dispondo de extensa biblioteca de blocos configuráveis e possibilidade de customização de blocos e funções, característica principal que motivou sua escolha. A ferramenta de simulação desenvolvida apresenta variação com período de hora em hora, logo, a base de dados ambientais foi escolhida considerando este critério (CRAWLEY ; LAWRIE, 2019), criada a partir de modelagem que tem como fonte as leituras disponibilizadas pelas estações meteorológicas dos aeroportos de Salvador-BA e Aracaju-SE.

Para realizar um teste de validação da ferramenta de simulação, foi realizada uma análise comparativa entre um sistema de geração fotovoltaica real em operação e um modelo implementado no *Simulink* com os parâmetros do referido sistema: especificações dos painéis, eficiência do Conversores Eletrônicos de Potência (CEP) e dados ambientais do local de instalação. Tal sistema de geração está localizado na cidade de Curitiba-PR, tendo sido escolhido pelo relacionamento próximo entre o autor da presente dissertação e o proprietário da planta de geração Curitibana, além da premissa de que a ferramenta de simulação deve ser replicável a diferentes condições de simulação. A comparação entre a planta de Curitiba e as simulações serviram para validar o modelo desenvolvido no *Simulink*.

Posteriormente foram conduzidas simulações considerando cenários hipotéticos criados tomando como referência uma micro rede a ser implementada no município de Jandaíra-BA, localizado no nordeste baiano próximo à divisa com o estado de Sergipe, a 220 km de Salvador. A população é de 10.726 pessoas distribuídas em pequenas localidades espalhadas pelo território de 640,77 km<sup>2</sup>, tendo como principais atividades econômicas a agropecuária e o turismo (IBGE, 2020). Esta localidade foi definida por se tratar de exemplo de possibilidade da aplicação de micro redes: o autor desta dissertação trabalhou com instalação de sistemas de geração fotovoltaica com armazenamento em baterias na região, ocasião em que conheceu os problemas e dificuldades relacionados ao fornecimento de energia elétrica à comunidade local, uma vez que algumas



localidades do município não são atendidas pela rede de distribuição de energia elétrica. Tal experiência foi motivadora para a realização deste estudo.

A análise dos cenários focou no balanço de potência entre geração, consumo e armazenamento, na queda de eficiência dos elementos do banco de baterias e no atendimento à demanda energética das cargas (residências consumidoras).

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A aplicação de micro redes de geração e distribuição é uma alternativa para atender a necessidade de fornecimento de energia elétrica para comunidades isoladas, uma vez que o sistema de distribuição convencional é ineficiente para atendimento a tais comunidades, seja por questões de caráter técnico ou econômico.

A topologia de rede investigada e a ferramenta de simulação foram desenvolvidos com o objetivo de serem replicados nos estudos para implementação de micro redes em outras comunidades e regiões carentes de acesso ao serviço de fornecimento de energia.

A ferramenta de simulação da micro rede desenvolvida utilizando o ambiente *Simulink* do *software MATLAB* tem capacidade de considerar as características locais de diferentes regiões de estudo, considerando os recursos energéticos locais disponíveis como irradiação solar, direção e velocidade do vento, que podem apresentar grande variação devido as dimensões continentais do Brasil. Desta maneira o conceito de micro rede discutido no estudo pode ser replicado e adaptado a diversas aplicações de geração híbrida com armazenamento junto às cargas consumidoras.

Uma premissa de projeto foi a não utilização de geradores a combustão devido ao considerável impacto ambiental resultante da utilização de geradores: produção de gases poluentes resultantes da queima; geração de ruído excessivo; riscos inerentes ao armazenamento deste combustível como vazamentos e produção de vapores inflamáveis. Existem também dificuldades de logística de fornecimento de combustível, uma vez que comunidades isoladas comumente são de difícil acesso: a localidade que motivou este estudo, por exemplo, é formada por pequenas vilas dispersas, acessíveis somente com o uso de tratores, veículos com tração nas 4 rodas e veículos de tração animal (carroças).

O estudo realizado nesta dissertação apresenta uma micro rede capaz de atender a demanda energética de comunidades com a utilização exclusiva de recursos energéticos

renováveis, através de simulações que auxiliam no dimensionamento e análise de sistemas de geração e armazenamento.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta o tema, contextualizando a motivação de realizar uma investigação sobre a aplicação de micro redes isoladas de geração e consumo, esclarecendo as hipóteses e objetivos que norteiam o estudo, apresentando os materiais e métodos utilizados e a justificativa para a execução do estudo.

No segundo capítulo é realizada a revisão na literatura, inicialmente é apresentada a utilização de micro redes no Brasil e no mundo. Seguindo com uma pesquisa sobre o estado da arte dos conceitos, equipamentos e *software* disponíveis, o capítulo apresenta, além das tecnologias disponíveis, como elas tem sido aplicadas através de pesquisa em artigos focados em estudos de caso, os quais relatam casos de sucesso no atendimento de comunidades isoladas.

O terceiro capítulo apresenta a topologia de rede e os sistemas que compõem a micro rede investigada pelo autor. Aprofundando a investigação do funcionamento da micro rede investigada, é exposta a ferramenta de análise de funcionamento e dimensionamento da micro rede, em ambiente de simulação computacional. O processo de criação da ferramenta de simulação desenvolvido pelo autor no ambiente *Simulink/MATLAB* é detalhado neste capítulo.

No quarto capítulo é realizada uma comparação entre um sistema de geração fotovoltaica real e em operação e uma simulação deste mesmo sistema na ferramenta de simulação desenvolvida. Neste capítulo também são apresentadas simulações considerando cenários hipotéticos de dimensionamento e operação de uma micro rede de geração híbrida integrada com sistema de armazenamento e cargas residenciais.

No quinto capítulo são expostas as considerações finais do estudo discutido na dissertação. É realizada uma síntese do processo de desenvolvimento e utilização da ferramenta de simulação e sua utilização como ferramenta de estudo e análise. O capítulo é encerrado com as sugestões para trabalhos futuros, com temas identificados como relevantes para continuidade do desenvolvimento e aperfeiçoamento da ferramenta de simulação.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor entendimento do desenvolvimento do trabalho é necessário apresentar o estado da arte e fundamentos técnico-operacionais das micro redes de geração e consumo, além dos cenários que podem ser beneficiados pela utilização das micro redes.

As subseções 2.1.1 a 2.1.4 apresentam uma breve revisão sobre as tecnologias envolvidas na geração e conversão de energia elétrica, tais como geradores fotovoltaicos, eólicos, acumuladores e conversores de potência. A subseção 2.1.5 introduz a utilização de *softwares* de simulação e desenvolvimento de projetos aplicados a sistemas de geração e consumo aplicáveis a redes isoladas.

Na seção 2.2 são apresentados exemplos dos principais equipamentos aplicáveis a micro redes, disponíveis no mercado brasileiro, com um breve resumo das especificações técnicas mais relevantes.

A seção 2.3 apresenta as topologias de rede mais utilizadas, considerando os equipamentos e características de dimensionamento e operação de micro redes em funcionamento, considerando o cenário brasileiro e mundial. Esta seção apresenta trabalhos de autores que investigaram diferentes modelos de micro redes isoladas, fornecendo conhecimento teórico e técnico para subsidiar a proposta de micro rede apresentada na subseção 2.3.1.

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando o custo de levar a rede elétrica de distribuição a uma comunidade isolada é muito alto, uma das alternativas é a criação de uma micro rede que possua geração e distribuição próprias, garantindo que toda a potência elétrica requerida pelas instalações e equipamentos seja fornecida de forma autônoma.

Programas de eletrificação rural são vitais para fomentar desenvolvimento socioeconômico e melhoria da qualidade de vida em comunidades distantes (MAHAPATRA; DASAPPA, 2012). Estes programas são uma solução passível de serem aplicadas às necessidades brasileiras, uma vez que o Brasil tem características geográficas desafiadoras, seja pela grande extensão territorial, variação de relevo, suas florestas e a variedade de condições climáticas com regimes de chuva e seca, essas

características limitam a capacidade de expansão e total cobertura do território através de malha de interligação elétrica.

O serviço de distribuição de energia elétrica é considerado essencial pela constituição federal, o artigo 10 da lei 7.783 de 28/06/1989 diz que “São considerados serviços ou atividade essenciais a produção e distribuição de energia elétrica” (CAMARGO et al., 2008). Porém a eletrificação de áreas afastadas, no Brasil, sempre foi precária.

O programa Luz para Todos, do governo federal é o exemplo mais recente de política pública voltada para extensão do acesso à energia elétrica. Até agosto de 2015, mais de 3,2 milhões de municípios foram atendidos. O programa atua com a distribuição de recursos e designação de órgãos governamentais responsáveis pela execução de ações que visem atendimento a domicílios situados no meio rural, priorizando o caráter social do investimento (MME, 2017).

Ainda no âmbito de atuação do Programa Luz para todos, foram identificadas situações em que o atendimento à população estava condicionado à execução de projetos especiais, uma vez que em certos casos era inviável ou até impossível a extensão de rede de distribuição devido à dificuldade de transporte de insumos e material pertinente às obras de interligação. Assim, o atendimento deveria ser realizado através de rede descentralizada, utilizando fontes renováveis compatíveis com a realidade local, com construção de pequenos trechos de distribuição em baixa tensão, configurando mini redes (MME, 2017).

No manual dos sistemas isolados e no Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), citado por MME (2017) e Pinho (2008), foram definidos parâmetros para atendimentos das comunidades cujo fornecimento fosse inviável pelos métodos convencionais. O manual define que para atendimento de consumidores com consumo inferior a 45 kWh/mês seriam implantados sistemas individuais de geração de energia elétrica com fonte intermitente (recurso energético renovável que não pode ser armazenado em sua forma original), integrados em microssistema isolados de geração e distribuição de energia elétrica com potência instalada total de geração de até 100 kW.

A aplicação de sistemas isolados era predominante no início do desenvolvimento das redes elétricas. As primeiras fontes geradoras eram instaladas e interligadas próximas às cargas, com o balanço entre geração e demanda compensado com sistemas de armazenamento de energia. A evolução tecnológica e econômica criou a

necessidade de centralizar a geração e interligar parques geradores e cargas através de sistemas de transmissão e distribuição (POULLIKAS, 2007).

No intuito de criação de mini ou micro redes, foi desenvolvido o conceito de “micro redes isoladas”. São redes permanentemente isoladas da rede convencional, por serem “ilhas”, devem priorizar a heterogeneidade de fontes de geração, devido ao caráter intermitente das fontes solar e eólica, tais fontes devem ter caráter complementar para garantir a disponibilidade de energia na rede. Além de diversidade de fontes, outro importante aspecto das micro redes isoladas é a necessidade de sistemas de armazenamento como, por exemplo, utilizando baterias (RIBEIRO et al., 2010).

Sistemas híbridos e principalmente fotovoltaicos podem obter bons parâmetros de operação ao serem associados com bateria chumbo ácidas, conforme relatado por May, Davidson e Mohanov (2018), pois respondem satisfatoriamente a um regime de carga e descarga oscilatório, também devido à baixa manutenção e grande quantidade de fabricantes e desenvolvimento de melhorias nos processos de fabricação.

Dentre as fontes viáveis, a fonte solar é promissora. O recurso solar é abundante no país, tornando a fonte solar uma opção a ser analisada (PEREIRA, 2017). A aplicação do recurso solar pode trazer ainda transformação socioeconômica à população do semiárido nordestino através da micro e mini geração fotovoltaica distribuída, desde que seja impulsionado por políticas públicas de fomento ao desenvolvimento econômico e inclusão social.

A grande maioria da literatura especializada aponta para o uso integrado de fonte solar, eólica e geradores diesel, com uso de baterias para armazenamento, provendo aumento da capacidade e continuidade no fornecimento de energia elétrica às cargas (ARAUJO et al., 2017), (RIBEIRO et al., 2010), (LI et al., 2013). Vários trabalhos de pesquisa citam a robustez e versatilidade de tais sistemas (BOUZID et al., 2015).

Uma das características essenciais de uma micro rede, é de que sua arquitetura e configuração deve ser tal que não seja necessário equipamento adicional que supervisione o estado e funcionamento das fontes de geração, ou seja, cada fonte geradora é conectada ao barramento e opera de maneira autônoma, onde uma falha em uma fonte não inutilizaria o barramento, uma vez que a fonte em falha se desconectaria do barramento e as demais fontes permanecem suprindo as cargas (HERNANDEZ et al., 2013).

O trabalho desenvolvido por Kumar et al. (2017) aborda um sistema de gerenciamento de micro rede instalada em área rural, com o uso de energias renováveis

disponíveis localmente como solar, eólica, gerador de “back-up” e banco de baterias para armazenamento. Seguindo a tendência dos estudos anteriormente discutidos, os autores aplicam uma modelagem em MATLAB integrada com análise no *software* HOMER PRO (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*).

No estudo realizado por Li et al. (2013), foram conduzidas simulações de viabilidade técnica e econômica em sistemas híbridos. Os sistemas incluindo fonte solar-eólica-baterias, apresentam economia entre 9 % a 11 %, em comparação a sistemas eólico-baterias ou solar-baterias. No mesmo estudo é relatado que as simulações realizadas no *software* HOMER confirmam que o sistema é capaz de suprir uma demanda residencial com confiabilidade e segurança.

A conclusão mais relevante dos autores Mokheimer et al. (2014) foi de que, ao realizar uma análise considerando um modo de operação crítica envolvendo geração fotovoltaica e eólica, além de conhecer o perfil das cargas, o dimensionamento das baterias pôde ser otimizado, em comparação com dados provenientes do HOMER gerando menores custos iniciais e custos de manutenção associados ao banco de baterias. Também concluíram que um incremento na geração eólica resulta em significativa redução nos custos relativos de energia. Uma maior participação de geração fotovoltaica com aumento da capacidade de armazenamento reflete em menor probabilidade de perda de fornecimento e aumento da energia disponível.

### **2.1.1 Geradores fotovoltaicos**

A energia solar é a mais abundante fonte de energia disponível, sendo a escolha mais direta na busca por fontes sustentáveis. O sol fornece à terra, anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh, o equivalente a 10.000 vezes o consumo mundial no período (PINHO, 2008).

A conversão da luz solar diretamente em energia elétrica é realizada através da absorção de fótons por células fotovoltaicas de silício, porém esta conversão só acontece quando fótons com comprimento de onda de até  $1,1 \mu\text{m}$ . Comprimentos de onda maiores que este valor somente geram calor, diminuindo a eficiência e aquecendo a célula (PINHO, 2008).

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 pelo cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel, em 1883, porém as primeiras células fotovoltaicas só foram fabricadas pelos laboratórios Bell na década de 1950, gerando aproximadamente 5 mW

em uma área de 2 cm<sup>2</sup> com eficiência de 6 %, atualmente a eficiência de conversão das células comerciais varia entre 14 e 18 % (PINHO; GALDINO, 2014).

A célula fotovoltaica é, portanto, uma superfície de silício extremamente fina, capaz de absorver os fótons, liberando elétrons e gerando corrente elétrica. O equipamento capaz de gerar eletricidade é, portanto, uma associação de células fotovoltaicas em painéis. As usinas de geração fotovoltaica são formadas por centenas e até milhares de painéis associados. Tipicamente, os painéis geram energia na faixa de 30 a 40 VDC com corrente de pico na ordem de 10 A (VILLALVA, 2015).

A associação de painéis fotovoltaicas é determinada conforme as características do projeto e dos equipamentos disponíveis, é possível determinar a quantidade de painéis em uma *string* e a quantidade de *strings* na usina. O tipo de associação de painéis escolhido depende da corrente e tensão de trabalho dos conversores, que são equipamentos que convertem a tensão da forma contínua *Direct Current* (DC) para alternada, também conhecida como *Alternating Current* (AC). As variáveis consideradas ao determinar a arquitetura da usina são a tensão e a corrente de trabalho dos CEP e das instalações. Os CEP interligados à rede, conhecidos como *grid-tie* costumam operar em 600 VDC, utilizando uma associação de painéis em série (ABB, 2019).

Nas instalações de sistemas desconectados da rede de distribuição convencional (*off-grid*), a associação pode variar de acordo com a potência total e a carga instalada, é possível utilizar sistemas em série com tensão de 40 VDC e corrente de até 60 A (HAYONIK, 2018).

### **2.1.2 Geradores eólicos**

Turbinas geradoras de eletricidade datam do início do século XX, porém entre a década de 70 e 90 a sua utilização ressurgiu como importante recurso de energia sustentável. Atualmente o custo da geração eólica é de 1/6 daquele percebido na década de 80. Além do custo, a performance também passou por significativo avanço. Em 1989, o estado da arte era uma turbina que gerava 300 kW com um rotor de 30 m de diâmetro. Somente 10 anos depois, era consolidada a geração de 1500 kW por rotores de 70 m de diâmetro (POULLIKAS, 2017).

Em 2010 era possível encontrar no mercado turbinas que apresentavam potência de 7,5 MW com diâmetro de rotor de 126 m e 135 m de altura. Em 2015 as turbinas disponíveis eram capazes de fornecer 10 MW com diâmetro de 145 m e 180 m de altura

(YARAMASU; WU; SEN; KOURO; NARIMANI, 2015). Tais equipamentos visam geração de grandes blocos de potência, destinados a usinas de geração.

Os geradores de pequeno porte também passaram por evolução significativa. Além dos geradores convencionais verticais com três pás, foram desenvolvidas turbinas de geração de pequeno porte, voltadas para aplicações localizadas com pequena potência instalada. Com preço acessível, existem opções de pequenos geradores com turbinas de duas pás com rotores de 4 m de diâmetro fornecem 3 kW com ventos a 12 m/s (SOLAR, 2020) ou ainda rotores de aproximadamente 6 m de diâmetro que geram 3,3 kW com ventos de 10 m/s.

Geradores com menor capacidade de geração foram desenvolvidos focando em consumidores rurais e residenciais, gerando energia com tensão compatível com uso residencial, aprimorando métodos de instalação, suportação e interligação elétrica visando expansão da utilização de geração eólica (SATRIX, 2011).

### **2.1.3 Controladores de carga**

São os equipamentos responsáveis por controlar a transferência da potência excedente gerada para o sistema de armazenamento. Quando associado a painéis fotovoltaicos, este equipamento monitora a tensão e corrente geradas, além do estado de carga das baterias (VILLALVA, 2015).

O controlador de carga faz a comutação das baterias entre os estados de carregamento, flutuação e serviç o, visando proteger o banco de baterias, melhorando seu rendimento e prolongando sua vida útil. Os controladores de uso mais difundido em instalações *off-grid* são do tipo *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) ou *Pulse Width Modulation* (PWM). Controladores MPPT são capazes de obter a potência máxima que os painéis têm capacidade de fornecer, enquanto controladores PWM têm custo reduzido, porém com rendimento menor que controladores MPPT (CENTER SOLAR, 2018).

Os autores Patel e Shah (2016) apresentam um algoritmo a ser implementado em um sistema de controle de carga, considerando um sistema de conversão AC-DC associados a circuito de eletr nica de potência capaz de estabilizar a corrente de carga das baterias e suavizar variações, submetendo o banco de baterias a um regime de carregamento contínuo e estável, e tirando o banco de baterias de operação quando o



estado de carga atinge valores críticos, característica desejável para uma operação segura e eficiente do sistema de armazenamento.

#### **2.1.4 Acumuladores**

Baterias chumbo-ácidas tem um alto nível de reciclagem e reaproveitamento. Segundo May, Davidson e Mohanov (2018), a reciclagem de tais baterias demanda baixa quantidade de energia, tendo até 99 % de seu material disponível para reuso, com índices de reciclagem mundial em torno de 95 a 99 % das baterias descartadas; nos EUA esse índice chega a 99 %.

Para operar com segurança e confiabilidade, micro redes necessitam de mecanismos de controle, além de correto dimensionamento e parametrização dos diversos componentes que formam o sistema (ALZHRANI et al., 2017). Para tal, existem ferramentas de modelagem e simulação que podem auxiliar o estudo e análise das redes (HERNANDEZ et al., 2013).

O estudo conduzido em Li et al. (2017) apresenta uma solução para o problema de descarte de baterias utilizadas em veículos elétricos. Tais baterias, uma vez “aposentadas” do uso veicular, apresentam 80 % da capacidade de armazenamento e capacidade de resposta, comparando com um modelo novo. Os autores apresentam o argumento de que, apesar de não apresentarem tempo de resposta necessário para utilização no trânsito, as baterias do tipo Li-íon têm características operacionais satisfatórias, ao serem empregadas em aplicações com menores restrições de operação.

As aplicações com sistemas de armazenamento são, predominantemente, dominadas por baterias chumbo ácidas estacionárias. Baterias estacionárias seguem métodos de construção semelhantes as baterias comuns, porém utilizando matéria prima de maior qualidade, melhorando seu desempenho. Além da profundidade máxima de descarga admissível, um importante parâmetro é o referente ao tempo de vida útil, o qual considera que, ao final da vida útil, a bateria irá armazenar uma carga equivalente a uma fração de sua capacidade nominal inicial (ALBRIGHT; EDIE; AL-HALLAJ, 2012).

#### **2.1.5 Conversores eletrônicos de potência**

Os critérios para escolha da arquitetura da micro rede devem levar em contas características locais, como perfil das cargas, recursos disponíveis no local, recursos de operação e manutenção, além de impactos sociais e ambientais (ARAUJO et al., 2017).

Devido à natureza dos dispositivos de armazenamento, pelo fato das baterias acumularem energia em tensão DC e a grande maioria das cargas trabalharem com tensão AC, torna-se necessária a conversão da energia por um componente fundamental em todas as arquiteturas: o CEP (BOUZID et al., 2015), (SMITH et al., 2015).

Bouzid et al. (2015) apresentam um conceito de aplicação de CEP operando em paralelo, com equipamentos específicos para controle de cada grandeza na rede. Também Morren (2006) e Qin, Yang (2013) apresentaram métodos de controle eficazes no controle de micro redes isoladas.

Para obter uma rede totalmente autônoma e confiável, um dos métodos mais eficaz é o “*Drooping control method*” ou estatismo. Neste método, o CEP tem comportamento similar ao de geradores síncronos, quando ocorrem variações na carga, pois ajustam os níveis de tensão e frequência buscando manter estas variáveis dentro de padrões de qualidade de energia (RIBEIRO et al., 2010).

No estudo conduzido por Guerrero et al. (2009) foi desenvolvido um método de controle para implementação de micro rede baseada em *Uninterruptible Power Source* (UPS). Através de sistema de controle da amplitude e frequência de saída dos conversores é possível controlar eficazmente os fluxos de potências ativa e reativa na micro rede. No referido estudo é relatado que conversores podem operar basicamente como fontes de corrente, quando existe uma tensão de referência ou fonte de tensão pura. Através do método de controle “*Droop control*”, podem ainda ser configuradas inércias virtuais nos conversores, garantindo que potência ativa e reativa sejam compartilhadas entre os conversores. O conceito convencional do “*Droop Control*” parte do princípio de que o controle da fase e amplitude de onda pelo conversor é capaz de controlar o fluxo de potência ativa e reativa, aproximando-se das características de um sistema de distribuição convencional.

Os “*Grid Forming Converters*” são equivalentes a uma fonte de tensão AC ideal com frequência fixa. Este equipamento gera um sinal de tensão e frequência de referência, provendo balanceamento entre os geradores e cargas. Conversores conhecidos por “*Grid Supporting Converter*” operam como fonte de tensão ou de corrente, de acordo com as características das cargas. Um diferencial desta arquitetura é o uso de “*Grid-Feeding Converters*”, estes fornecem energia ativa ou reativa à rede. Este último não deve operar em uma rede isolada na ausência de um “*Grid Forming*” ou “*Grid Supporting*” na rede, pois estes geram a referência de operação para o “*Grid-feeding converter*” (BOUZID et al., 2015).

Com a finalidade de diminuir a variação na frequência, banco de baterias podem ser incluídos na rede. As baterias são capazes de absorver potência excedente ou fornecendo potência em curtos espaços de tempo (JAYALAKSHMI; GAONKAR, 2011), além de prover um controle mais eficiente da frequência na rede, estabilizando mais rapidamente seu valor após variações repentinas na carga. No estudo realizado por May, Davidson e Mohanov (2018) são relatados casos em que bancos de bateria com capacidades que chegam a 3,0 MW, 528 VDC, os quais tem por função estabilizar e fornecer segurança de suprimento desde indústrias a zonas residenciais.

### **2.1.6 Software de simulação**

O dimensionamento de micro redes pode ser feito de maneira mais assertiva e com elevado grau de confiabilidade se ferramentas de simulação forem utilizadas para avaliação de cenários normais e críticos de operação.

Alguns *softwares* disponíveis no mercado tem sido utilizados em estudos de otimização de dimensionamento e critérios de operação, tais como: HOMER PRO, RETScreen e MATLAB (KUMAR et al, 2017), (MOKHEIMER et al, 2014), (BEHERA; NANDKEOLYAR, 2017), (SIZEMORE; MUELLER, 2016) (LI, C et al., 2013) (SINHA; CHANDEL, 2014), (SMITH et al., 2015), (AL-SHARAFI; YILBAS; SAHIN; AYAR, 2017).

O *software* HOMER PRO foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), nos Estados Unidos em 1943. Caracterizado pela funcionalidade de apresentar análises comparativas técnico-econômicas, ao integrar diferentes fontes de geração em redes isoladas *off-grid* ou sistemas de geração conectados à rede de distribuição convencional (*on-grid*). O *software* permite entrar com dados de recurso energético disponível, tipos de equipamentos utilizados e características das cargas. Fornecendo uma análise técnico-econômica, permite otimizar o dimensionamento da rede considerando certas diferenças de entrada, como variação nas fontes de energia e de consumo (LI, C et al., 2013).

As simulações conduzidas no HOMER PRO são utilizadas, em sua maioria, para determinação de menor custo de implementação de rede. Apresenta algumas limitações de utilização como período máximo de simulação de 8760 horas (1 ano), não considera variações na tensão do barramento e variações em intervalos menores que 1 hora, além de não considerar a profundidade de descarga das baterias, importante parâmetro para otimização de sistemas de armazenamento (SINHA; CHANDEL, 2014).

O *software* RETScreen é uma ferramenta de análise de viabilidade desenvolvida em 1998 pelo ministério de recursos naturais do Canadá para avaliação de impactos ambientais e financeiros provenientes da utilização de diferentes métodos e tecnologias de geração renováveis em diferentes localidades, utilizado somente para sistemas *on-grid*. Basicamente recebendo como entrada a localização pretendida das instalações de geração, dados de dimensionamento de projeto, perfil das cargas tipos de equipamentos de conversão. Como saída o *software* apresenta uma análise de viabilidade técnica, financeira e ambiental, além também de análise de risco e eficiência energética (SINHA; CHANDEL, 2014).

O *software* MATLAB tem ampla utilização na área de cálculo numérico, análise de dados, programação, modelagem e simulação. Em ambiente que integra programação através de linhas de comando com diagrama de blocos, é uma ferramenta poderosa para diversas áreas de pesquisa (SIZEMORE; MUELLER, 2016). Ele também dispõe de uma ferramenta de modelagem, análise e simulação de sistemas dinâmicos com interface gráfica que permite desenvolvimento de modelos baseados em blocos pré-existentes, além de criação de blocos customizáveis. O ambiente de programação do *Simulink* também permite interação com funcionalidades do MATLAB (MITA, 2018).

A capacidade de análise de sistemas dinâmicos, vinculada a capacidade de análise de dados do levou o MATLAB a ser aplicado, principalmente, na otimização de sistemas de geração de energia, associando as análises dinâmicas de operação das redes com resultados obtidos na fase de dimensionamento no HOMER PRO. No estudo conduzido por Kumar et al. (2017), foi aplicada uma análise de operação visando otimização dos resultados obtidos no dimensionamento obtido no HOMER PRO.

Com um modelo de rede desenvolvido no *Simulink*, os autores Behera e Nandkeolyar (2017) realizaram uma análise ao longo do tempo de um sistema de geração híbrida associada a um sistema de armazenamento. Através da aplicação de blocos disponíveis no *Simulink* e criação de blocos customizados, conduziram um estudo investigando a estabilidade da frequência e tensão da rede quando submetidos a variação de carga e de geração.

A rede investigada, composta de geração fotovoltaica, eólica e pela variação das marés (através de armazenamento de energia por ar comprimido), fornece energia a cargas residenciais em uma pequena ilha. A integração dos métodos de geração e armazenamento, quando suscetíveis a variações na carga e nas fontes de energia causa variações na tensão e frequência da rede (BEHERA; NANDKEOLYAR, 2017).

## 2.2 EQUIPAMENTOS

Um fator a ser considerado no desenvolvimento de micro redes é a disponibilidade de equipamentos. É fundamental que seja observada a compatibilidade entre fontes de geração, equipamentos de controle e conversão. Por exemplo, painéis de geração fotovoltaica podem ser associados em série ou paralelo para atender características de tensão e corrente máxima de controladores de carga. O mesmo raciocínio se aplica às baterias, que podem ser associadas para atender tensão de operação dos conversores de potência por exemplo (VILLALVA, 2015).

A Tabela 1 apresenta informações relevantes de alguns painéis de geração fotovoltaica disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 1 - Fabricantes de painéis fotovoltaicos

Fabricante	SunPower	Panasonic	Canadian	Canadian	Jinko
Modelo	SPR-X21X345	VBHN325SJ47	405 halfcell	CS6U	JKM400M
Eficiência	21,40 %	19,5 %	18,33 %	16,5 %	19,88 %
Potência de pico	345 Wp	325 Wp	405 Wp	315 Wp	400 Wp

Fonte: Adaptado de Neosolar (2018) e Center Solar (2019).

A utilização de painéis fotovoltaicos associados a banco de baterias, em grande parte das aplicações, requer o emprego de controladores de carga. A Tabela 2 apresenta exemplos de controladores comercialmente disponíveis:

Tabela 2 - Fabricantes de controladores de carga

Fabricante	Epever	Bluesolar	Sun21
Modelo	Tracer415AN	MC4	CCS-M4024
Algoritmo de carga	MPPT	MPPT	MPPT
Tensão máx. painéis	150 Vdc	150 Vdc	100 Vdc
Tensão máx. baterias	68 Vdc	48 Vdc	48 Vdc
Potência máx. painéis	5,33 kW	2,6 kW	1,1 kW
Corrente carga/descarga	100 A	70 A	40 A

Fonte: Adaptado de Neosolar (2018) e Center Solar (2019).

Apesar da maior aplicação de geração eólica no Brasil estar centrada em grandes usinas, também existem fabricantes de geradores eólicos de baixa potência no mercado brasileiro. A Tabela 3 apresenta exemplos de geradores de baixa potência, com valores

de velocidade de vento mínima necessária que são compatíveis com aplicações discutidas neste estudo.

Tabela 3 - Fabricantes de geradores eólicos

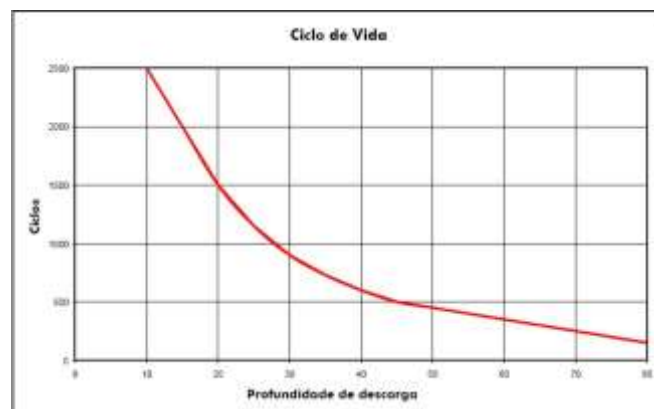
Fabricante	Eco Solar	Satrix	Satrix	Satrix
Potência máxima	3 kW	1,1 kW	1,7 kW	3,3 kW
Velocidade nominal	8 m/s	8 m/s	14 m/s	10 m/s
Velocidade máx.	13,5 m/s	10 m/s	16 m/s	14 m/s
Tensão geração	24 Vdc	110/220 Vac	110/220 Vac	110/220 Vac
Diâmetro rotor	2,9 m	3,27 m	1,9 m	2,93 m
Altura recomenda	Não consta	20 m	20 m	20 m
Vida útil estimada	Não consta	25 anos	25 anos	25 anos

Fonte: Adaptado de Satrix (2011) e Damia Solar (2020).

O banco de baterias é o elemento que garante a continuidade do fornecimento de energia nos períodos de baixa ou falta de geração. Também é o elemento que têm maior impacto no custo inicial de instalação, além da necessidade de reposição ou substituição de elementos devido a vida útil reduzida, quando comparada a outros elementos da micro rede.

A Figura 1 apresenta como o tempo de vida das baterias é afetado pelo número de ciclos e profundidade de descarga.

Figura 1 - Queda no tempo de vida útil das baterias



Fonte: NEO SOLAR (2019).

Considerando a necessidade de obter o máximo de rendimento, postergando a necessidade de troca de baterias, comumente são utilizadas baterias do tipo estacionária, que são baterias chumbo-ácidas fabricadas com matéria prima de melhor

qualidade, prolongando o ciclo de vida das baterias. A Tabela 4 apresenta fabricantes de baterias estacionárias, disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 4 - Fabricantes de baterias

Fabricante	Fulguris	Freedom	Moura
Modelos	FGCL220	DF4100	12MS234
Capacidade nominal	220 Ah	240 Ah	200 Ah
Tensão Nominal	12 Vdc	12 Vdc	12 Vdc
Profundidade de descarga	20 a 30 %	20 a 30 %	20 a 30 %
Nº ciclos máx.	1600	1500	1800
Vida útil alegada pelo fabricante	Não consta	Acima de 4 anos	Acima de 4 anos

Fonte: Adaptado de Center Solar (2019).

Os conversores de potência podem ser interligados ao sistema de geração fotovoltaica ou ao sistema de armazenamento. Na Tabela 5, o CEP do fabricante USFULL é um modelo para associação direta a painéis fotovoltaicos, enquanto o CEP do fabricante TRACER é híbrido, podendo operar interligado à rede de distribuição convencional ou a um banco de baterias.

Tabela 5 - Fabricantes de CEP

Fabricante / modelo	USFULL / 9000SI	TRACEL
Tensão entrada	150 a 400 / 250 a 800 Vdc	Até 800 Vdc
Tensão saída	220 / 380 Vac	127 / 220 Vac
Potência nominal	2,2 kW	20 / 30 / 50 kW
Corrente entrada máx.	24 / 5,8 A	215 A
Corrente saída	10 / 5 A	52 / 79 / 130 A
Frequência saída	47 a 63 Hz	59,5 a 60,5 Hz
Algoritmo carga	MPPT	Não informado

Fonte: Adaptado de Tracel (2019) e Energia Livre (2019).

### 2.3 MICRO REDES DE GERAÇÃO

O dimensionamento de um sistema isolado de energia distribuída é altamente dependente da capacidade de produção, armazenamento e consumo de energia ao longo do tempo. Ao considerar a sazonalidade da disponibilidade e consumo de energia, os autores Li et al. (2017) abordam o dimensionamento através da aplicação de modelo que considera as variações de temperatura, velocidade dos ventos e irradiação solar para determinar o recurso energético disponível.

O autor Alex (2014) conduziu um estudo em uma comunidade isolada no Himalaia, Nepal. O autor discute um dimensionamento utilizando dados de irradiação e ventos médios ao longo do ano prevendo as épocas de alta e baixa disponibilidade de energia, a capacidade de geração e armazenamento pode ser estimado de maneira crítica, mantendo a segurança do suprimento sem necessariamente ter um número excessivo de elementos armazenadores.

A dificuldade de acesso e obstáculos de logística de fornecimento de combustível inviabilizaram o uso de geradores a combustão, assim o sistema de geração foi totalmente renovável. Devido a necessidade de armazenamento e capacidade de despacho de energia, os sistemas híbridos com armazenamento devem considerar o estado de carga e ciclo de descarga, pois a continuidade do suprimento depende desta interação. Tal interação pôde ser analisada com a condução do cálculo de dimensionamento conduzido em ambiente MATLAB (ALEX, 2014).

Os autores Rehman e Al-hadhrami (2010) fazem uma análise de micro rede em vila na Arábia Saudita, supridas por um sistema compreendendo geradores a diesel associados a sistema fotovoltaico e baterias para armazenamento. O local tem abundante fonte solar e encontra dificuldades logísticas para manter o fornecimento de diesel, devido ao isolamento. Os custos tendem a aumentar com o aumento do combustível e devido a aumento da demanda na vila. Os autores utilizam o *software* HOMER e a base de dados interna para estimar a energia gerada, em um dia típico, a cada mês, além de considerar o consumo médio diário da vila. Como dados de entrada, o HOMER recebe, além da irradiação, o perfil de consumo das cargas e características de operação da rede.

O *software* é capaz de analisar diferentes combinações de cenários, baseados em parâmetros de controle como variação de custo de combustível, fração de fontes renováveis utilizáveis, estado de carga médio das baterias, além de custo inicial e de



manutenção do sistema. Os cenários consideram o custo do óleo diesel ao determinar o balanço das fontes de geração, combinando a geração diesel e fotovoltaica.

Os autores concluem que com o crescente aumento nos custos do óleo diesel associados à diminuição nos custos de equipamentos associados à fonte solar e conversão de energia irão aumentar a viabilidade econômica de tais sistemas híbridos, quando estes consideram maior participação de energias renováveis, tais como a solar.

Rehman e Al-hadhrami (2010) aprofundam o estudo de micro redes isoladas, no sentido de ir além do dimensionamento dos montantes de energia gerados e consumidos. A investigação foca na aplicação de sistemas de armazenamento de energia visando o controle da tensão e frequência da rede para garantir níveis adequados de fornecimento. Devido à baixa inércia associada à micro rede, os CEP têm menor tempo para reagir a flutuações na rede. Em certos casos em que a geração fotovoltaica ou solar não estejam em níveis capazes de absorver tais flutuações, a estabilidade da tensão e potência disponível podem ser garantidas por um sistema de armazenamento associado a CEP capazes de suprir demanda de energia reativa, desta maneira controlando as flutuações na rede.

O controle de potência fornecida a rede foi abordado por Behera e Nandkeolyar (2017), implementando um modelo de simulação no ambiente MATLAB, utilizando o método “*Phasor 60 Hz*”, indicado para simulações com fontes de corrente controlada (SIZEMORE; MUELLER, 2016). O modelo considera um gerador síncrono e um sistema fotovoltaico, associados a cargas residenciais e um sistema de armazenamento para fornecer energia para controle da frequência e manutenção do nível de tensão. Quando os geradores operam com capacidade e ocorre aumento de carga, o sistema de armazenamento responde a súbita variação de frequência injetando potência ativa para manter o nível de tensão da rede.

O estudo conclui que a utilização de sistemas de armazenamento, ainda que em redes que contenham geradores síncronos, pode incrementar a capacidade de resposta a distúrbios na rede, poupando os geradores. O sistema de armazenamento deve estar associado a conversor capaz de fornecer potência reativa para, assim, proceder com um controle eficaz nos níveis de tensão e corrente.

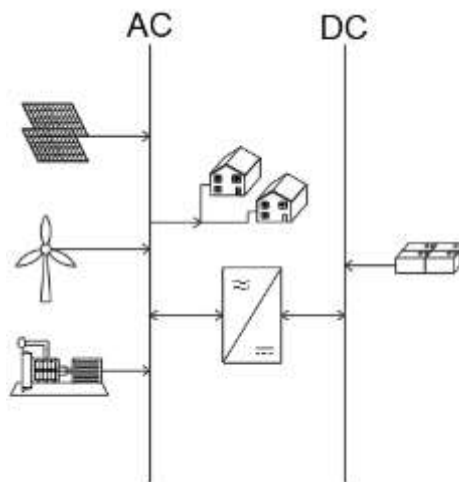
O trabalho desenvolvido por Kumar et al. (2017) aborda um sistema de gerenciamento de micro rede instalada em área rural, com o uso de energias renováveis disponíveis localmente como solar, eólica, gerador de “*back-up*” e banco de baterias para

armazenamento. Seguindo a tendência dos estudos anteriormente discutidos, os autores aplicam uma modelagem em MATLAB integrada com análise no HOMER PRO.

Os autores Kumar et al. (2017) defendem a topologia de micro rede com associação de painéis fotovoltaicos, gerador eólico como fonte primária, associados a um banco de baterias para armazenamento e um gerador a diesel de reserva. Tal arranjo foi escolhido por ser uma premissa de projeto que a predominância de fonte de energia fosse renovável.

O sistema projetado consiste de um pequeno sistema de geração a diesel, sistema de geração fotovoltaica e eólico e CEP bidirecional para manter fluxo de potência entre o barramento DC e AC, visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Arquitetura de micro rede



Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2017).

A premissa de operação da rede é de atendimento da carga. O fluxo de potência deve garantir o suprimento em detrimento do carregamento do banco de baterias. O estudo considerou duas abordagens. Em um primeiro momento a fonte solar e eólica são operadas visando puramente atender a carga. No caso das fontes renováveis não forem suficientes, o banco de baterias fornece potência até atingir um estado de carga de 20 %. No segundo cenário, no caso de as fontes renováveis não atenderem a carga, o gerador diesel assume a demanda, fornecendo potência às cargas e carregando o banco de baterias, até que este atinja 80 % da capacidade, desligando em seguida. Em ambos os cenários o gerador diesel entra em operação em qualquer momento que o banco de baterias atinge um estado de carga de 20 %.

Os cenários são analisados com base em dois algoritmos, o primeiro denominado LFC (*Load Flow Controller*), um algoritmo interno do *software* HOMER. O segundo foi chamado pelos autores de PSC (*Proposed System Controller*), desenvolvido pelos autores. Assim, o LFC visa atender a carga, em detrimento do banco de baterias que é considerado como baixa prioridade. O PSC considera o balanço de potência gerada pelas fontes renováveis e a capacidade do banco de baterias, colocando em operação o gerador diesel quando necessário (estado de carga das baterias em 20 %).

Em ambos algoritmos, as simulações consideraram uma expansão da carga em 6,9 % ao ano, com um horizonte de 10 anos de operação via simulação. O dimensionamento da micro rede otimizada esta apresentada na Tabela 6:

Tabela 6 - Dimensionamento otimizado

	Solar (kW)	Eólica (kW)	Diesel (kW)	CEP DC/AC (kW)	Baterias (elementos)
LFC	500	100	300	700	800
PSC	600	100	200	400	1000

Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2017).

Os autores não forneceram maiores detalhes sobre o banco de baterias. O estudo de caso apresentado por Kumar et al. (2017) demonstra que a simulação no ambiente MATLAB é uma ferramenta excepcional na aplicação de desenvolvimento de redes de geração e consumo, uma vez que permite ajustes conforme a necessidade do programador, além de possibilidade de adição de elementos. O *software* HOMER é limitado ao seu algoritmo interno, uma vez que é um *software* de análise de viabilidade técnica e econômica.

A aplicação de micro redes como solução para o atendimento a comunidades isoladas foi discutida no estudo realizado por Ribeiro et al. (2010): os autores participaram de um projeto com apoio do Ministério de Minas e Energia, em parceria com a UFMA, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPQ) e da Eletrobrás. O projeto foi desenvolvido na ilha de Lençóis, no norte do estado do Maranhão.

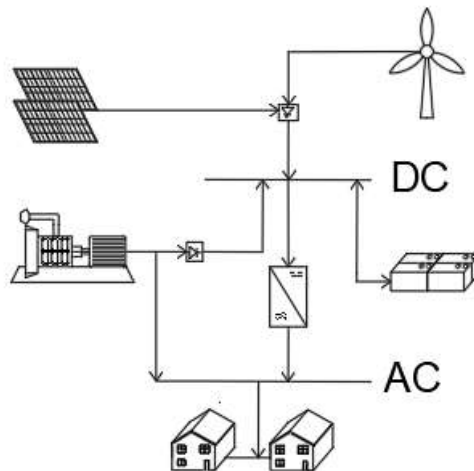
A comunidade atendida consiste em 90 casas com aproximadamente 390 habitantes, além de um posto de saúde e uma escola, com consumo aproximado de 4200 kWh/mês. Antes da implementação do projeto, havia no local um sistema trifásico alimentado por um gerador diesel com 30 kVA de potência, operando das 18 h às 22 h com custo mensal de R\$ 25,00 por mês para cada residência.

O desenvolvimento inicial da micro rede considerou uma demanda instantânea estimada de 9,5 kW com crescimento projetado de 1,5 % ao ano, no período subsequente de 10 anos esperava-se atingir uma demanda de 12 kW com consumo de 4.800 kWh/mês.

O sistema dimensionado consistia de Sistema fotovoltaico composto por 9 strings, com 18 painéis, Sistema Eólico composto por 3 turbinas geradoras com potência nominal de 7,5 kW (velocidade de vento de 13,8 m/s), Gerador Diesel de 53 kVA/48 kW, como uma unidade de contingência utilizado quando há falha, queda na geração fotovoltaica/eólica ou manutenção do sistema e Banco de baterias com tensão nominal de 240 VDC, composto por 120 elementos dispostos em 6 “linhas” (*strings*), tendo cada elemento capacidade de 150 Ah dispostos na rede da Figura 3.

Como premissas de projeto, os autores identificaram a necessidade de operar todos os componentes com eficiência máxima. A principal consequência da aplicação desta premissa diz respeito ao modo de operação do gerador: operando a vazio, o consumo de combustível é de 40 % o consumo de operação a plena carga. Portanto, quando em operação, o gerador deve operar com capacidade máxima e a energia gerada deve ser utilizada com eficiência.

Figura 3 - Estrutura da micro rede



Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2010).

A solução proposta foi de que o gerador entrasse em operação somente quando o banco de baterias atingir um valor mínimo de estado de carga de 30 % e o gerador deve operar até o banco de baterias atingir 100 % da carga, além de fornecer a energia demandada pelas cargas durante a operação.

Os equipamentos de conversão também foram dimensionados considerando minimizar possibilidade de perda de suprimento e eficiência de operação. Foram utilizados 2 conversores trifásicos de 20 kVA, associados a filtros para minimizar o efeito de harmônicas, proveniente da alta frequência de chaveamento. Os conversores operam em modo “*quasi-parallel*” onde, uma vez que a carga seja igual ou menor a 25 % da carga nominal, um dos conversores é desligado.

Para total autonomia o sistema opera em método de “paralelismo”, onde um conversor não se comunica com outros, através de método chamado de “Drooping Method”, ou estatismo. No caso de aumento na potência ativa de alteração na frequência e amplitude da tensão de saída o conversor assemelha-se ao controle de velocidade realizado em máquinas rotativas de geração, cada conversor realiza o controle “Drooping” sem necessidade de comunicação com os demais elementos.

Entre os resultados e conclusões do estudo, as mais significativas foram de que, anteriormente o custo era de R\$ 25,00 por mês para cada residência pelo fornecimento das 18 h às 22 h. Após a implantação, este custo passou para R\$ 30,00 por um serviço de fornecimento de energia disponível 24 h por dia.

No primeiro ano (2008), o gerador operou por 24 horas, no segundo ano (2009), operou por 400 horas devido a estação chuvosa severa (janeiro a junho), ainda assim representando 4,56 % do tempo de amostragem. Durante o período de análise (entre 2008 e 2009), 16 baterias apresentaram problemas (13 % do total): 4 delas por defeito causado por falhas no transporte e 12 devido à falta de carga por tempo prolongado.

O modelo de rede proposto foi inovador ao introduzir o conceito de que o gerador diesel é uma unidade única e exclusivamente de contingência para ser utilizado somente quando ocorressem falhas ou excepcional falta de recurso energético renovável. Os dados de operação com o gerador diesel comprovam que é possível minimizar o seu uso. Os autores Ribeiro et al. (2010) informam que a comunidade local relatou grande melhoria na geração de ruídos provenientes da operação do gerador e redução significativa da fumaça que se espalhava durante as horas de operação do mesmo. Outra inovação foi a centralização das potências fornecidas pelas fontes geradoras no barramento DC, permitindo que os CEP fossem os únicos responsáveis pelo fornecimento de potência ativa e reativa, além do controle dos níveis de tensão e frequência.

Os autores refletem que as inovações impostas pelo modelo de rede proposto e implementado foram essenciais para atender adequadamente os requisitos de robustez,

confiabilidade e adaptabilidade necessários a operação de redes isoladas, considerando as variações climáticas visando minimizar as necessidades de intervenção no sistema.

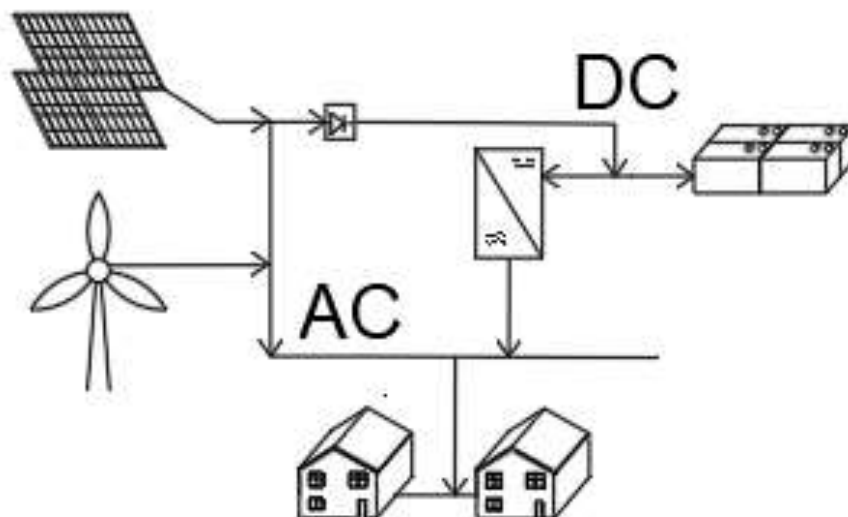
### 2.3.1 Topologia investigada

A topologia proposta por este estudo integra conceitos aplicados por Ribeiro et al. (2010) e Kumar et al. (2017), os quais consideram o banco de baterias como elemento central da rede. Estes autores apresentam configurações de equipamentos de conversão capazes de fornecer potência ativa e reativa à rede, com estabilidade de tensão e frequência. Portanto a utilização de geradores é exclusiva para atendimento contingencial, na falta de recursos energéticos solar e eólico, ou em paradas para manutenção.

A topologia proposta neste estudo, além do método de dimensionamento, investiga a utilização de simulação para determinar a capacidade do banco de baterias fornecer a energia necessária, mesmo em condições de contingência e queda de geração.

A topologia proposta está apresentada na Figura 4:

Figura 4 - Topologia de rede investigada



Fonte: O autor.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Comunidades isoladas no Brasil são tipicamente formadas por baixa demanda de energia e de difícil acesso. O sistema descrito por Ribeiro et al. (2010) é capaz de atender a demanda energética em comunidades e ilhas isoladas, reduzindo consideravelmente os níveis de emissão de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), as dificuldades logísticas ligadas ao transporte de combustível, integrando o conceito de utilização dos recursos energéticos disponíveis localmente, com foco em sustentabilidade e preservação ambiental.

Observando a evolução dos equipamentos de geração fotovoltaica e eólico, além de equipamentos de armazenamento, sobretudo a eficiência das baterias, a presente dissertação aspira a propor um modelo de rede totalmente independente de fontes baseadas em combustíveis fósseis, tais como diesel e gasolina. A literatura especializada apresenta uma evolução nos sistemas híbridos, com destaque para os estudos apresentados por Ribeiro et al. (2010) e Kumar et al. (2017), os quais relataram a utilização de geradores a diesel única e exclusivamente como ação contingencial.

Nesta dissertação foi considerada e analisada uma micro rede baseada somente em sistema de geração fotovoltaica e eólica, associado a banco de baterias, propondo total independência de geradores a combustão.

### 3 MICRO REDE INVESTIGADA

Para que as micro redes tenham desempenho adequado, com níveis de tensão em faixa útil para uso de equipamentos e que o balanço de potências elétricas ativa e reativa entre geração e cargas seja equilibrado é necessário que o projeto contemple as variáveis relevantes e as restrições operacionais. Na seção 3.2 é realizada descrição do modelo de micro rede investigado, discutindo a topologia e os subsistemas que compõem a micro rede.

Na subseção 3.2.1 é apresentada a ferramenta de simulação da micro rede desenvolvida no ambiente *Simulink* do *software* MATLAB, o qual integra o modelo de micro rede investigado com o ambiente de simulação.

O sistema de geração híbrida proposto é detalhado na seção 3.3, com a descrição do arranjo dos blocos e funcionalidades disponibilizados pelo *Simulink*, além das equações de modelagem que compõem o ambiente de simulação.

O subsistema que modela os acumuladores de energia, com as equações e arranjo dos blocos de simulação são apresentados na seção 3.4. As cargas implementadas na simulação são detalhadas na seção 3.5.

O funcionamento básico do sistema de geração híbrida é detalhado na seção 3.6, com a descrição da integração dos equipamentos associados a geração e conversão da energia fornecida à micro rede.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA MICRO REDE

A micro rede isolada investigada é composta por: sistema de geração híbrida, contendo gerações fotovoltaica e eólica; sistema de armazenamento; CEP de potência e consumidores.

A energia proveniente dos geradores solar e eólico é injetada diretamente na rede e a energia excedente é armazenada no banco de baterias. Este por sua vez está associado a um CEP responsável por transformar a tensão contínua em alternada, compatibilizar o valor de tensão do banco de baterias ao da rede, fornecer potência reativa e controlar a frequência da rede.

As cargas consideradas são tipicamente residenciais, foram previstas cargas indutivas e capacitivas que venham a requerer fornecimento de potência reativa, porém sempre dentro de parâmetros esperados por aplicações residenciais.

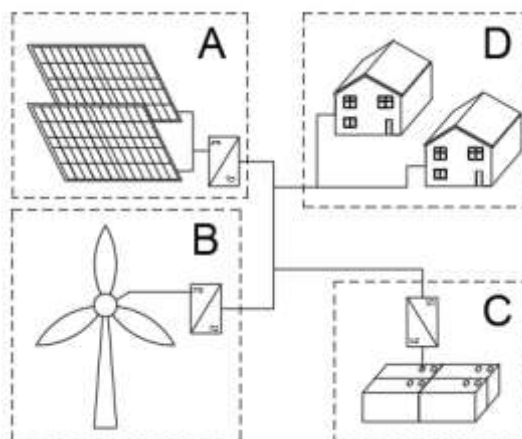


O modelo de micro rede investigado engloba:

- Geração fotovoltaica de em baixa tensão associada a CEP de frequência;
- Geração eólica associada a CEP de frequência;
- Banco de baterias com equipamento de controle de carga e CEP de frequência;
- Cabeamento de distribuição residencial;
- Cargas residenciais.

Na Figura 5, o modelo de micro rede investigado está dividido em subsistemas. O subsistema A representa a geração fotovoltaica, o subsistema B representa a geração eólica. Ambos estão detalhados na seção “3.2 Geradores” deste capítulo. No subsistema C estão as baterias e o CEP, descritos detalhadamente na seção “3.3 Acumuladores de energia”. O subsistema D é formado pelas cargas, para efeito de dimensionamento e simulação, foram consideradas cargas tipicamente residenciais, descritas na seção “3.4 Cargas”.

Figura 5 - Modelo Simplificado



Fonte: O autor.

O sistema de geração deve ser dimensionado prevendo períodos de queda no recurso energético disponível, considerando a demanda das cargas e uma capacidade de geração excedente, utilizada para carregar o banco de baterias.

Os parâmetros básicos de dimensionamento do banco de bateria são a tensão de trabalho e a capacidade total de armazenamento. O projeto da micro rede deve levar em consideração que toda a energia demandada pelas cargas deve ser suprida pelos geradores eólico e fotovoltaico e o excedente será armazenado no banco de baterias, considerando uma margem de segurança que prevê aumentar o tempo de vida dos elementos e garantir o suprimento.

O CEP associado ao banco de baterias é responsável por fornecer potência reativa, regulando e estabilizando a frequência de rede.

O estudo tem como alvo pequenas localidades de caráter residencial ou pequenos comércios. Logo as cargas serão tratadas como residenciais e espalhadas por espaço geográfico limitado a algumas centenas de metros, portanto não é necessário o uso de transformadores comumente utilizados nas redes de distribuição convencionais, uma vez que a tensão de distribuição da micro rede pode ser de baixa tensão, no máximo 380 V.

### **3.1.1 Integração com simulação em MATLAB**

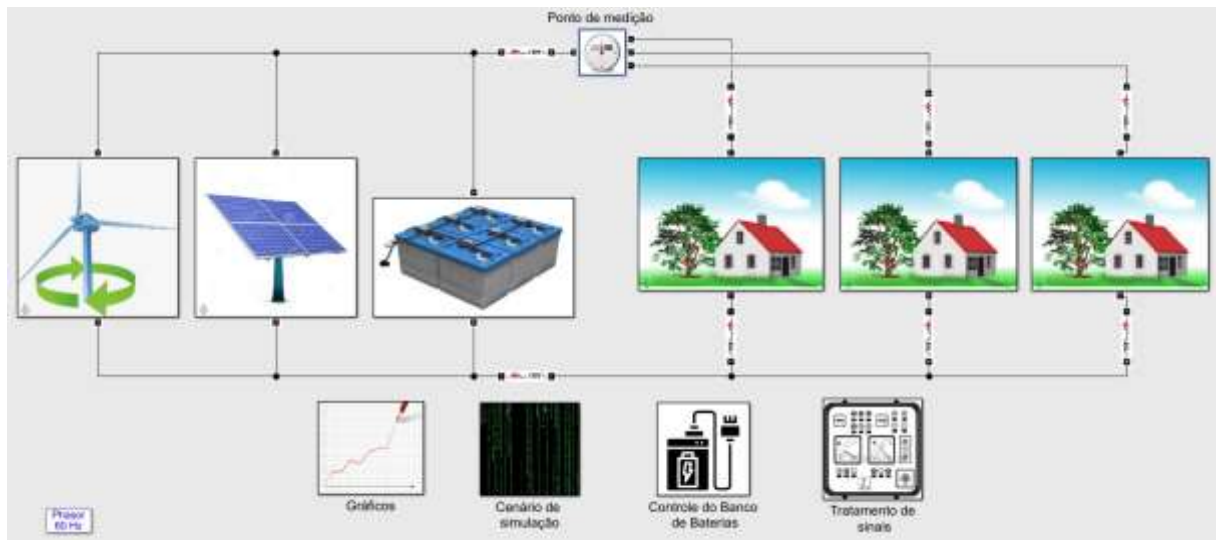
A ferramenta de simulação foi desenvolvida a partir de um exemplo “*demonstration*” em pequena escala de micro rede de geração distribuída disponível na comunidade virtual *MathWorks*, que consiste em uma rede de geração e consumo integrada a rede de distribuição e transmissão (MITA, 2018).

A simulação é a ferramenta principal de estudo, uma vez que contempla um método para facilitar o dimensionamento do sistema de geração e armazenamento, considerando fatores ambientais relativos aos recursos energéticos disponíveis e fatores de operação dos equipamentos envolvidos. Concebida para ser adaptável para diferentes regiões do país e situações de geração e consumo, é necessário somente obter os dados ambientais da região objeto de estudo, as características das cargas e equipamentos de geração e armazenamento utilizados.

Além de fornecer ferramentas para auxílio a otimização do dimensionamento, a simulação desenvolvida contempla o consumo e geração de potência reativa, uma variável importantíssima para analisar a qualidade da energia gerada e controlar variações na tensão de fornecimento, além de diagnosticar situações críticas, visando também fornecer dados para especificação de equipamentos.

A Figura 6 apresenta a visão geral da ferramenta de simulação desenvolvida.

Figura 6 - Visão geral da micro rede em ambiente MATLAB



Fonte: O autor.

Os dados de entrada fornecidos para a simulação são: os dados ambientais representando o recurso energético disponível como irradiação solar e velocidade de ventos e a variação da temperatura local; a irradiação solar; a velocidade dos ventos e a variação de temperatura.

Os dados ambientais são gerados a partir de modelos de previsão meteorológica, compilados pelos autores Crawley e Lawrie (2019). Esta base de dados, por sua vez, utiliza como referência a estação meteorológica do aeroporto de Salvador-BA e de Aracaju-SE que fornece a velocidade do vento na altura de 10 metros ao nível do solo (CEDAR LAKE VENTURES INC, 2020), nenhum estudo específico da topografia local foi realizada, o que pode ser necessário no caso de micro redes de maior potência do que a investigada no presente trabalho (potência de pico de 6,19 kW, disponível na Tabela 11, pág. 98). Realizar o mapeamento anual local de fontes eólicas e solares por pelo menos um ano é custoso, podendo inviabilizar economicamente os projetos de baixa potência.

A variação de consumo das cargas é simulado através da implementação de uma curva de variação típica residencial, apresentada na seção 3.4.

As curvas características dos geradores eólicos, conforme disponibilizados por Satrix (2011), disponibilizadas na Figura 11 (p. 50), foram utilizadas para estimar a geração eólica considerando o rendimento de geradores conforme disponíveis no mercado brasileiro.

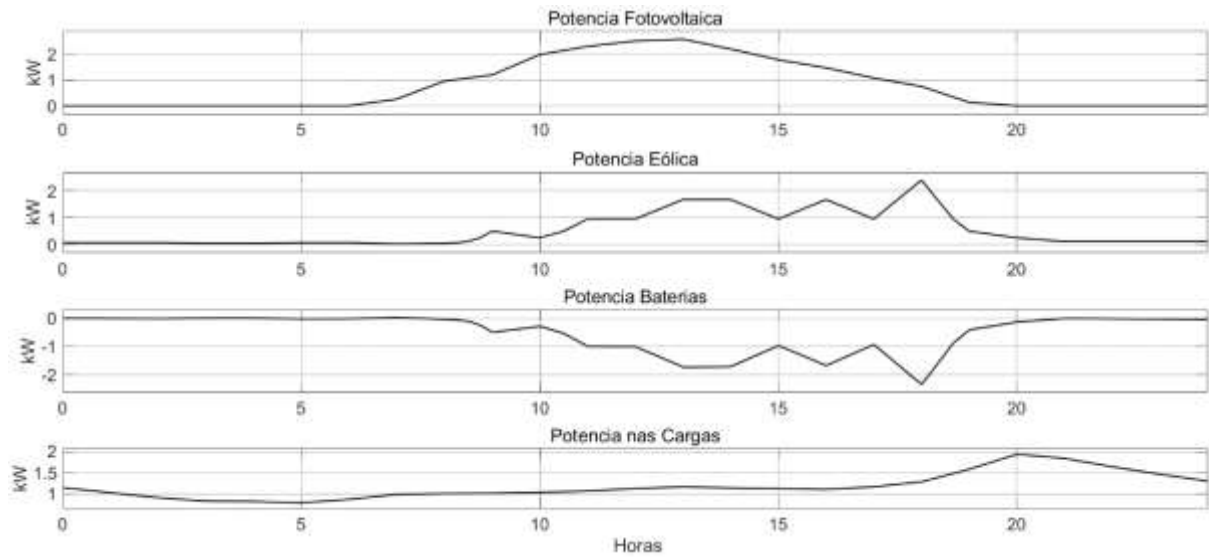
O subsistema de armazenamento é um elemento chave do modelo, uma vez que o ele é a reserva energética que mantém a micro rede em funcionamento nos períodos de baixa ou nenhuma capacidade de geração das fontes solar e eólica, uma vez que a premissa de projeto é não contar com geradores a combustão, comumente utilizados em situação de queda na geração.

A Figura 7 apresenta dados brutos de geração, como a potência fotovoltaica gerada a partir dos dados de irradiação diária com intervalo de uma hora para um dia típico de verão, a geração eólica contempla a variação da velocidade do vento e a curva característica de geração de gerador eólico disponível no mercado o regime de operação do banco de baterias possibilitando visualizar o tempo de carga e descarga e a profundidade de descarga atingida.

Ainda na Figura 7 tem-se o perfil de consumo de potência das cargas, considerando uma estimativa de consumo tipicamente residencial, baseada na curva de carga estimada residencial disponibilizada por EPE (2020). Uma análise inicial dos resultados sugere a necessidade de atenção ao dimensionamento das baterias, uma vez que as gerações solares e eólicas na localidade de Jandaíra não são complementares, desta maneira, a carga será alimentada exclusivamente pelo banco de baterias durante o período da tarde, da noite e início da manhã.

Os dados de geração da Figura 7 são provenientes de testes iniciais da ferramenta utilizando o aerogerador EcoSolar 1K descrito na Tabela 3, os painéis solares modelo CS6U descritos na Tabela 1 e baterias modelo 12MS234 do fabricante Moura (Tabela 4). A definição dos cenários começa a ser estabelecida a partir dos resultados visualizados durante a fase de testes do desenvolvimento da ferramenta de simulação.

Figura 7 - Potência gerada e consumida



Fonte: O autor.

Nas seções seguintes serão abordados, separadamente, cada subsistema do modelo, descrevendo o processo de desenvolvimento relacionando com os equipamentos elétricos associados ao modelo, além de abordar características de operação relevantes para criar um modelo de simulação fiel as condições de operação dos equipamentos e sistemas.

## 3.2 GERADORES

O subsistema de geração é composto por gerador fotovoltaico e eólico, que serão discutidos separadamente. Inicialmente foi necessário obter dados sobre o recurso energético disponível, a irradiação solar e velocidade do vento, para definir os parâmetros do subsistema baseado nos dados de entrada disponíveis visando criação de ambiente de simulação próximo as condições reais de funcionamento.

### 3.2.1 Geração fotovoltaica

Os painéis solares geram tensões contínuas com níveis de tensão típicos entre 12 VDC e 48 VDC de amplitude e com alguns ampères de corrente, no máximo 10 A para painéis tipicamente utilizados em instalações residenciais. Para atingir a potência de geração necessária, os painéis podem ser associados em série ou paralelo. A associação em série tem a vantagem de limitar a corrente em valores mais baixos e elevar a tensão da Interligação elétrica entre painéis fotovoltaicos (*string*). Esta

configuração mais compatível com os equipamentos de conversão modernos, que operam até a faixa de 600 VDC. Este arranjo também permite uma economia de material elétrico, uma vez que são necessários condutores de menor seção reta com menor custo.

O dimensionamento de um sistema de geração fotovoltaica deve levar em consideração a área total dos painéis, a eficiência, potência gerada, tensão e corrente de pico e de trabalho, além é claro do recurso energético disponível, ou seja, a irradiação solar.

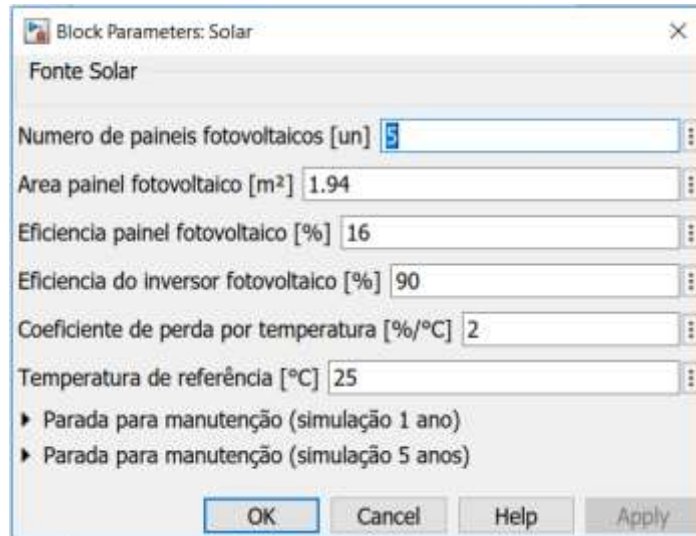
Apesar da geração fotovoltaica ser uma fonte intermitente, os dados sobre irradiação solar existentes e as séries históricas vêm acrescentando confiabilidade e precisão à previsão do recurso solar disponível. Logo é possível dimensionar um sistema de geração fotovoltaica com um bom nível de confiabilidade quanto aos montantes de energia gerados. O aspecto intermitente pode ser minimizado quando associado a outras fontes de geração.

A variação da irradiação solar é a principal informação necessária para a simulação, porém a geração fotovoltaica também é fortemente influenciada pela temperatura das células de geração, apresentando queda na geração com aumento da temperatura (VILLALVA, 2015), portanto a variação da temperatura influencia na potência total gerada.

A geração fotovoltaica também depende das características dos painéis solares utilizados, porém como a variação de tais características varia de acordo com o fabricante, para efeito de dimensionamento dos painéis solares serão consideradas características genéricas de painéis, tais como: eficiência, área útil, coeficiente de queda de geração e temperatura referência.

A área e eficiência do painel são características intrínsecas do equipamento, uma vez que este estudo visa auxiliar o dimensionamento em diferentes situações, a escolha de fabricante e modelo deve ser adaptada a situação de instalação específica, considerando a área de telhado disponível, potência nominal por módulo fotovoltaico, custo, dificuldades de importação etc. A Figura 8 apresenta a tela inicial de entrada de dados do gerador fotovoltaico.

Figura 8 - Parametrização do gerador fotovoltaico



Fonte: O autor.

A tensão nos terminais dos painéis fotovoltaicos deve ser convertida de DC para AC, portanto a eficiência do CEP é considerada para estimar a potência gerada. O coeficiente de perda por temperatura também é inerente ao fabricante, uma boa prática é de utilizar valores mais conservadores. A temperatura de referência de 25°C é comumente utilizada pelos fabricantes, porém a simulação admite alterar este parâmetro. A função geração fotovoltaica está expressa na equação 1:

$$P_{fv} = (Irrad * Afv * Nfv * EFfv * EFinv) * [1 - (Tinst - Tref) * Ct] \quad (1)$$

Na qual:

$P_{fv}$ : Potência fornecida pela geração fotovoltaica (kW)

$Irrad$ : Irradiação solar (W/m<sup>2</sup>)

$Afv$ : Área de um modulo de geração fotovoltaica (m<sup>2</sup>)

$Nfv$ : Número de módulos de geração (un)

$EFfv$ : Eficiência dos módulos de geração fotovoltaica (%)

$EFinv$ : Eficiência do CEP (%)

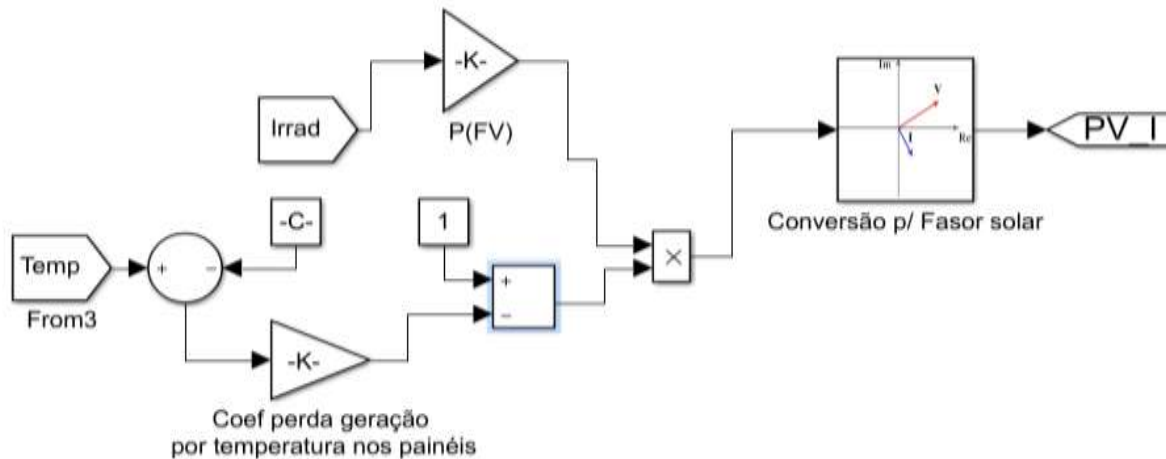
$Tinst$ : Temperatura ambiente (°C)

$Tref$ : Temperatura de referência (°C)

$Ct$ : Coeficiente de perda por temperatura (%/°C)

O ambiente de simulação Simulink/MATLAB apresenta ambiente de construção com uso de blocos pré-definidos e blocos configuráveis, a equação 1 está implementada pelo arranjo exposto na Figura 9.

Figura 9 - Arranjo de geração fotovoltaica



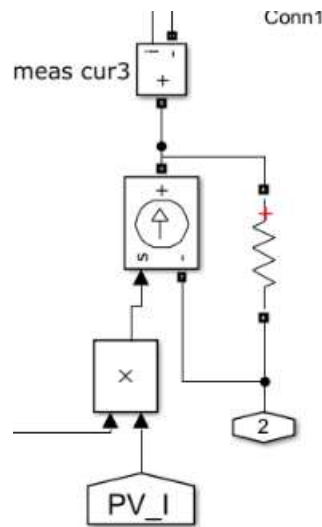
Fonte: O autor.

No bloco de conversão para fasor, é construído o fasor de referência para a fonte de corrente. O modo de simulação utilizado no MATLAB é o “*Phasor 60 Hz*”, este modo de simulação carrega algoritmos que utilizam módulo e fase das grandezas elétricas envolvidas, logo o valor absoluto de potência fotovoltaica gerada é utilizado como módulo na construção do fasor, a fase é obtida por uma referência senoidal de 60 Hz, semelhante a um “*grid forming converter*”, discutido na seção que trata da micro rede isolada.

O fasor gerado é uma referência para uma fonte de corrente controlada, exposta na Figura 10. A tensão de referência no barramento é fornecida pelo “*grid forming converter*”, o gerador fotovoltaico opera como uma fonte de corrente injetando potência na rede, de maneira similar ao funcionamento de múltiplos geradores no sistema de geração distribuída convencional.



Figura 10 - Fonte de corrente controlada por fasor



Fonte: O autor.

### 3.2.2 Geração Eólica

A geração eólica é uma opção viável para aumentar a possibilidade de geração, sobretudo no Brasil, que é um país com boa incidência solar e de ventos, porém nem sempre a ocorrência de ventos segue obrigatoriamente o ciclo solar, ou seja, o pico de geração eólica não é necessariamente simultâneo ao pico de geração fotovoltaica, como foi observado na análise diária feita para a localidade utilizada para a investigação (ver dados de geração eólica e solar da Figura 7). Devido à abundância do recurso eólico e solar na região, a associação destas duas fontes é particularmente interessante para pequenas aplicações, mesmo quando não existe a complementariedade das fontes, o excedente de energia gerado é utilizado para garantir continuidade no fornecimento, seja para as cargas ou para o armazenamento.

A capacidade de geração eólica é função da velocidade do vento e da capacidade do gerador eólico converter a energia cinética presente no vento em energia elétrica. Esta conversão é função de grande quantidade de variáveis inerentes aos geradores, que vão desde materiais de construção, estado de conservação etc. Seguindo a premissa de que a ferramenta de simulação deve ser versátil, possibilitando simular diferentes cenários de geração, optou-se por utilizar a curva característica dos aerogeradores, normalmente fornecidas pelos fabricantes (SATRIZ, 2011).

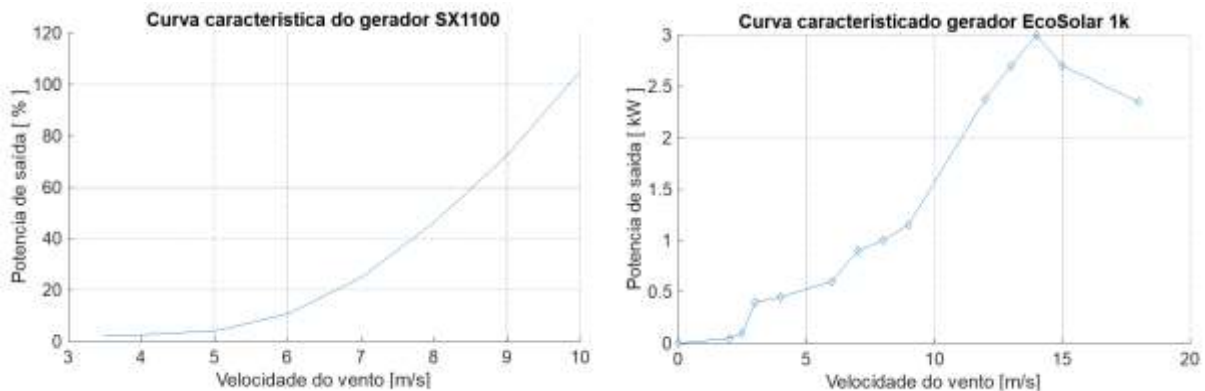
Além das grandes usinas de geração eólica com geradores de centenas de metros de altura, os geradores de pequeno e médio porte tem apresentando considerável

evolução. Existem aerogeradores de pequeno porte, disponíveis no mercado nacional, que apresentam bom rendimento, com velocidade de vento relativamente baixa e custo acessível, alguns modelos são capazes de fornecer 3 kW com ventos de 10 m/s (SATRIX, 2011). Estes aerogeradores operam com baixa tensão e demandam pouca manutenção, com especial atenção à manutenção preventiva.

O dimensionamento dos geradores eólicos considera basicamente a velocidade do vento e características mecânicas e elétricas dos geradores. Os fabricantes apresentam curvas de rendimento (exemplo na Figura 11), onde é relacionada a velocidade do vento com a energia gerada. Tais curvas consideram todas as perdas dos geradores. Fabricantes de geradores de pequeno porte tendem a disponibilizar geradores com baixa tensão de trabalho e em tensão DC ou AC, simplificando o acoplamento elétrico entre a geração, conversão e armazenamento.

Esta curva apresenta a potência disponibilizada pelo gerador *versus* a velocidade do vento. Como essa curva é fornecida pelo fabricante baseada em testes reais de funcionamento, este parâmetro é confiável e objetivo para ser utilizado na simulação.

Figura 11 - Curva característica de geradores eólicos



Fonte: Adaptado de Satrix (2011).

A Figura 11 apresenta curvas características de dois modelos de geradores eólicos (EcoSolar de 1 kW e SX1100 de 11,1 kW), implementados na simulação. As curvas características dos aerogeradores consideram todas as perdas mecânicas e elétricas, obtidas em testes de performance conduzidos pelo fabricante, com resultados disponibilizados por Satrix (2011).

O procedimento de criação de curva característica de aerogeradores é simples, inicialmente devem ser obtidos os dados do equipamento: uma tabela que relacione a potência de saída com a velocidade do vento, semelhante aos dados na Tabela 7:

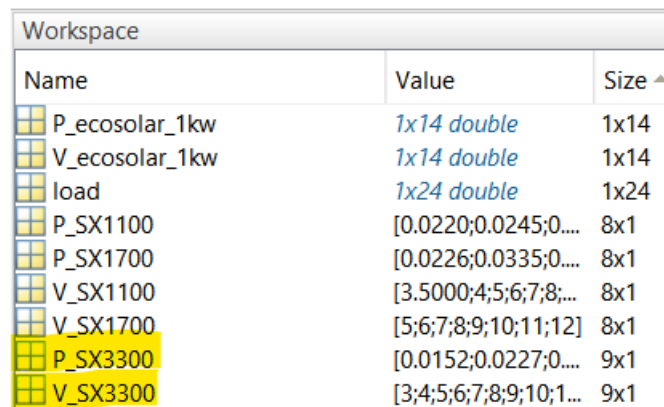
Tabela 7 - Dados de curva característica do aerogerador SX330.

Potência (kW)	Vento (m/s)
0,015151515	3
0,022727273	4
0,037878788	5
0,083333333	6
0,166666667	7
0,318181818	8
0,560606061	9
0,803030303	10
0,939393939	10,5

Fonte: Adaptado de Satrix (2011).

Em seguida os dados devem ser importados para o “*Workspace*” do MATLAB, no formato de vetor. Deve ser criado uma variável para a potência e uma para a velocidade do vento, como na Figura 12:

Figura 12 - Variáveis do aerogerador SX3300 no Workspace

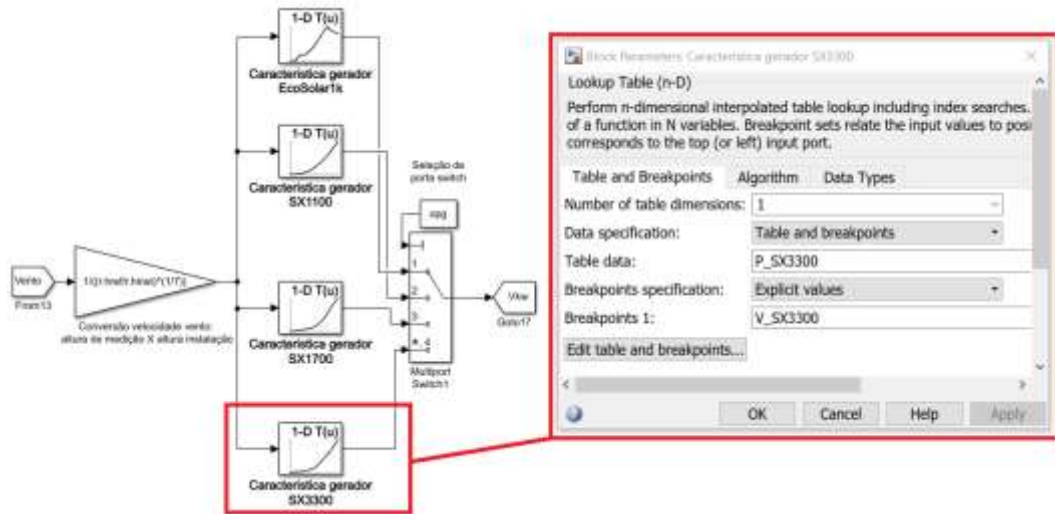


Workspace		
Name	Value	Size ^
P_ecosolar_1kw	1x14 double	1x14
V_ecosolar_1kw	1x14 double	1x14
load	1x24 double	1x24
P_SX1100	[0.0220;0.0245;0...	8x1
P_SX1700	[0.0226;0.0335;0...	8x1
V_SX1100	[3.5000;4;5;6;7;8;...	8x1
V_SX1700	[5;6;7;8;9;10;11;12]	8x1
P_SX3300	[0.0152;0.0227;0...	9x1
V_SX3300	[3;4;5;6;7;8;9;10;1...	9x1

Fonte: O autor.

O próximo passo é configurar o bloco “*Lookup Table*” referente ao aerogerador, que pode ser observado na Figura 13:

Figura 13 - Bloco Lookup Table do aerogerador SX3300



Fonte: O autor.

Finalizando a configuração, deve ser informado no campo “*Table data*” a variável com a potência de saída do aerogerador, e no campo “*Breakpoints*” a variável com a velocidade do vento. Desta maneira foi inserida uma curva característica que relaciona potência de saída em função da velocidade do vento incidente.

A função de geração eólica pôde ser simplificada com a adoção da curva característica. Na simulação é utilizada uma função em que a tabela de dados é submetida a variação da grandeza no eixo das abscissas (velocidade do vento), e como saída apresenta a potência gerada. A função de geração eólica é representada na equação 2:

$$P_{eol} = PkW(v) * EFinve \quad (2)$$

Na qual:

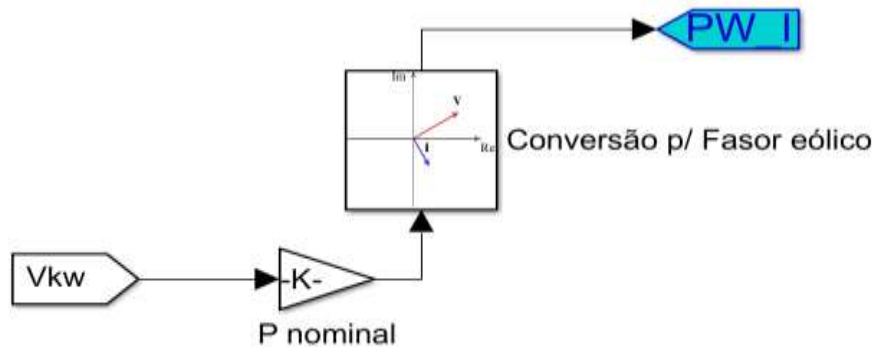
$P_{eol}$ : Potência fornecida pela geração eólica (kW)

$PkW(v)$ : Potência gerada em função do vento [kW/(m/s)]

$EFinve$ : Eficiência do conversor eólico (%)

A eficiência de conversor eólico foi considerada, pois alguns geradores podem ser dotados de CEP ou os níveis de tensão gerados não serem compatíveis com o sistema, logo um fator de eficiência pode aproximar a simulação de situações reais de operação. Na Figura 14 mostra o bloco de ganho “P nominal”, que contempla esta eficiência ao gerar a referência para a criação do fasor de geração eólica.

Figura 14 - Função de geração eólica



Fonte: O autor.

A Figura 15 apresenta a parametrização do sistema de geração eólica. Nela é selecionada a curva característica referente ao aerogerador utilizado e a potência nominal do gerador.

Figura 15 - Parametrização da geração eólica

A imagem mostra a janela de configuração 'Block Parameters: Eolico'. A interface contém os seguintes campos e opções:

- Subsystem (mask)
- Potencia Nominal do Gerador Eólico [KW]: 3
- Eficiencia do inversor Geração eólica [%]: 100
- Altura de medição da velocidade do vento [m]: 10
- Altura de instalação do aerogerador [m]: 20
- ▶ Seleção de gerador eólico
- ▶ Parada para manutenção (simulação 1 ano)
- ▶ Parada para manutenção (simulação 5 anos)

Na base da janela, há botões para 'OK', 'Cancel', 'Help' e 'Apply'.

Fonte: O autor.

Nesta etapa de configuração também deve ser informada a altura de instalação do aerogerador e a altura na qual foi realizada as medições da velocidade do vento. Estes dados são necessários para realizar a correção da velocidade do vento nos casos em que a altura de instalação for diferente daquela utilizada para levantamento dos dados

referentes a variação da velocidade do vento. O cálculo de correção está demonstrado na equação 3 (USACE, 2003).

$$V_{inst} = V_{ref} \left( \frac{h_{inst}}{h_{ref}} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3)$$

Na qual:

$V_{inst}$ : Velocidade do vento na altura de instalação (m/s)

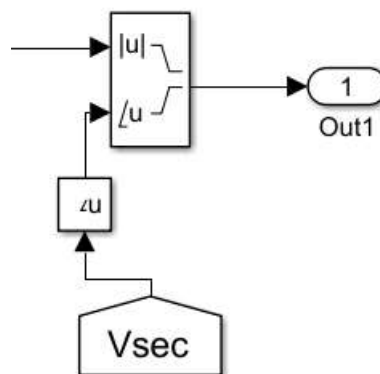
$V_{ref}$ : Velocidade do vento na altura de medição (m/s)

$h_{inst}$ : Altura de instalação do aerogerador (m)

$h_{ref}$ : Altura de medição (m)

De maneira semelhante a geração fotovoltaica, é criado um fasor referência (Figura 16) para uma fonte de corrente que simula a geração eólica. O fasor é composto pelo módulo, que é a saída da função de geração eólica e a fase da fonte senoidal de referência.

Figura 16 - Fonte de corrente da geração eólica



Fonte: O autor.

### 3.3 ACUMULADORES DE ENERGIA

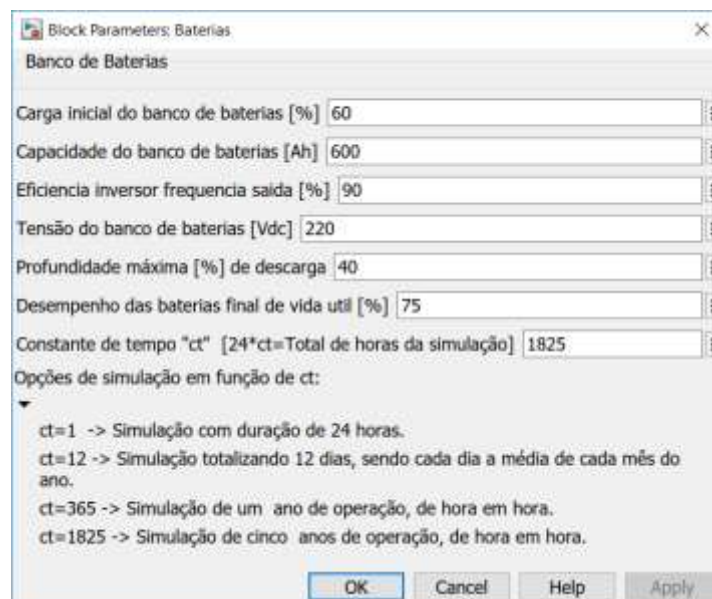
A premissa básica do modelo de micro rede investigado é de não haver gerador a combustão na rede, comumente utilizado para suprir demandas na falta da geração fotovoltaica e eólica. Tais fontes são consideradas intermitentes e o regime de geração diário pode variar dependendo da região geográfica em estudo.

Por exemplo, os dados de irradiação e ventos utilizados na simulação deste estudo, (dados referentes ao município de Jandaíra) mostram que os picos de irradiação solar e de velocidade de vento coincidem ocorrem durante o dia. A irradiação solar máxima é próxima das 12 h, enquanto o pico de velocidade do vento acontece ao final do dia (CRAWLEY; LAWRIE, 2019).

Para garantir a continuidade do suprimento e confiabilidade na operação da micro rede, foi proposta a utilização de banco de baterias para armazenamento da energia excedente gerada e fornecimento de energia quando a geração for insuficiente. O armazenamento é o elemento chave da micro rede, pois a continuidade do suprimento às cargas depende de um correto dimensionamento do banco de baterias. A segurança energética da micro rede será determinada pela integração entre banco de baterias e geradores.

O modelo original disponibilizado por MITA (2018) era um modelo mais simplificado de sistema de armazenamento que considerava somente o acúmulo da energia excedente e o percentual de carga disponível. Para desenvolvimento deste estudo foram feitas adaptações e melhorias no controle de armazenamento, visando atingir os objetivos do estudo. A parametrização do controle de armazenamento é apresentada na Figura 17:

Figura 17 - Parametrização do banco de baterias



Fonte: O autor.

Além da carga inicial e capacidade, a simulação contempla a eficiência do conversor de frequência de saída, uma vez que a energia está armazenada em baterias que operam com tensão terminal contínua, sendo necessária a conversão para tensão alternada AC para acoplamento com os geradores e fornecimento de energia compatível com as cargas residenciais.

A tensão do banco de baterias é uma variável que depende do tipo de elementos de armazenamento utilizado e seu arranjo. Esta escolha é um parâmetro de projeto que

considera, entre outros fatores, custo e tecnologias disponíveis. Portanto o subsistema de armazenamento foi desenvolvido visando a possibilidade de parametrização atendendo variados arranjos de instalação.

A profundidade máxima de descarga é um parâmetro de escolha do projetista, através deste parâmetro é possível estimar o tempo de vida útil das baterias através da quantificação de ciclos versus profundidade de descarga, além de garantir o fornecimento através de um coeficiente de segurança. Este limite de profundidade de descarga garante que, com a geração disponível e a capacidade armazenada, o banco de baterias estará continuamente com uma carga mínima, conforme especificação. Em condições especiais o banco pode ser solicitado além deste limite para garantir o fornecimento.

Na revisão bibliográfica (seção 2.1.4), foi identificado um fator de decaimento do rendimento das baterias ao longo de sua vida útil (ALBRIGHT; EDIE; AL-HALLAJ, 2012), o rendimento das baterias é impactado de tal maneira que, ao final de sua vida útil mesmo após longo período em carga, a carga armazenada ficará limitada a um determinado percentual de sua capacidade nominal original. Logo um banco de baterias de 1000 Ah, com queda de rendimento de 20 %, ao final de seu tempo de vida útil irá armazenar um valor máximo de 800 Ah.

Os fabricantes de baterias mencionados na Tabela 4 (seção 2.2) informam que a vida útil das baterias são superiores a 4 anos, porém o tempo de vida das baterias pode ser estimado em função da quantidade de ciclos e profundidade de descarga (ilustrados na Figura 1, seção 2.2), logo existe um grau de incerteza ao estimar o tempo de vida útil a ser utilizado nas simulações: este parâmetro pode ser influenciado pelas condições de operação das baterias. Por exemplo: caso o banco de baterias seja dimensionado incorretamente, a profundidade de descarga pode ser maior, diminuindo o tempo de vida útil esperado.

Através da experiência obtida pelo autor deste trabalho durante implantação de projetos de geração fotovoltaica utilizando banco de baterias, pôde ser observado que a vida útil das baterias disponíveis no mercado variam entre 2 a 5 anos. Portanto todas as simulações e análises realizadas na condução deste trabalho consideraram o valor mais conservador para este parâmetro: tempo de vida útil equivalente a 2 anos.

Este comportamento foi implementado na simulação para criar um ambiente de dimensionamento capaz de prever a operação da micro rede durante período mínimo de dois anos sem necessidade de intervenção no banco de baterias ou eventual



substituição, desde que as condições de operação atendam as recomendações dos fabricantes, quanto a quantidade de ciclos de carga e descarga e profundidade máxima de descarga (CENTER SOLAR, 2018) e (NEOSOLAR, 2019).

Um importante parâmetro de dimensionamento a ser considerado é quanto a autonomia de fornecimento do banco de baterias. Esta autonomia é expressa em determinado período, normalmente em dias, em que o sistema de armazenamento é capaz de manter o suprimento.

A principal implicação deste parâmetro é refletida na capacidade nominal do banco de baterias. A ferramenta de simulação foi desenvolvida para testar os valores de dimensionamento e a interação entre a geração e consumo, logo a autonomia pode ser considerada anteriormente a parametrização da simulação.

O autor Villalva (2015) apresenta a seguinte relação, baseada na definição de parâmetros de operação: tensão de trabalho do sistema; autonomia desejada em dias; profundidade de descarga e fator de segurança. Também é necessário conhecimento prévio do consumo de energia diário das cargas a serem atendidas, no qual irá ser baseada a autonomia. A equação 4 (VILLALVA, 2015) demonstra a estimativa da capacidade nominal do banco de baterias, considerando a autonomia desejada e a profundidade máxima de descarga desejada (estado de carga mínimo desejado para as baterias).

$$Ah_1 = \frac{E_d * T_D * Ec_{min}}{V * 100} \quad (4)$$

Na qual:

$Ah_1$ : Capacidade estimada do banco de baterias (Ah)

$E_d$ : Consumo diário das cargas (kWh)

$T_D$ : Autonomia de fornecimento desejada (dias)

$Ec_{min}$ : Estado de carga mínimo desejado (%)

$V$ : Tensão de operação do sistema (dias)

Considerando a capacidade nominal inicial (que contempla a autonomia desejada) para simulação de um cenário realista que considere a capacidade desejada corrigida em função da queda de rendimento das baterias, a equação 5 apresenta um método para corrigir a capacidade nominal inicial do banco de baterias:

$$Ah = \frac{Ah_1}{100 - N_{bat}} \quad (5)$$

Na qual:

$Ah$ : Capacidade nominal do banco de baterias (Ah)

$Ah_1$ : Capacidade estimada do banco de baterias (Ah)

$N_{bat}$ : Queda de rendimento das baterias (%)

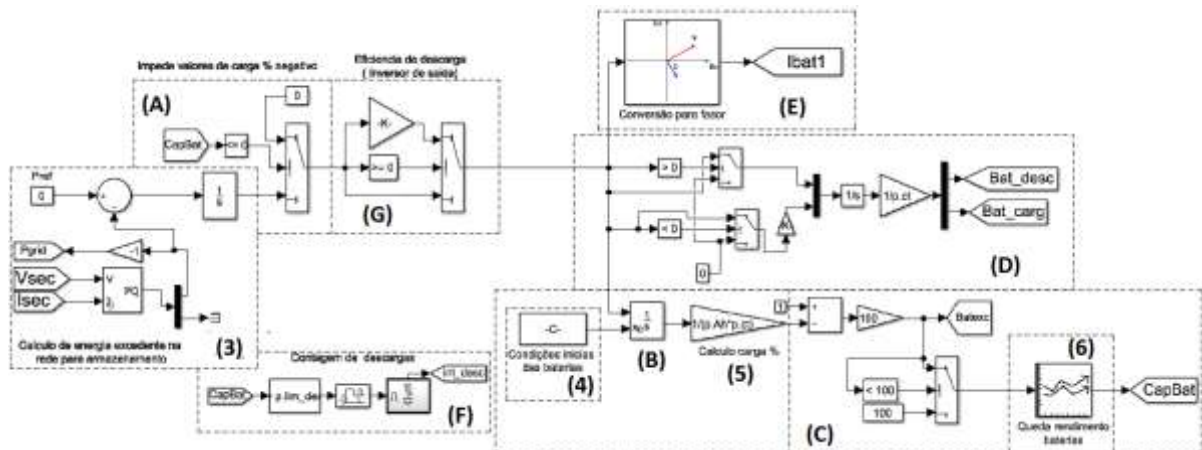
O termo  $N_{bat}$  refere-se à variação percentual entre o estado de carga no início da vida útil e aquele ao término da vida útil das baterias.

Para prover diferentes cenários de estudo, a ferramenta de simulação foi desenvolvida para simular o funcionamento da micro rede nas seguintes opções:

- 24 horas de funcionamento;
- 12 dias, considerando a média diária de geração para cada mês do ano;
- 365 dias com variação horária;
- 5 anos, com variação horária.

Na Figura 18 é apresentada uma visão geral do bloco de controle do banco de baterias. As letras de A à F representam subseções e os números representam as equações.

Figura 18 - Controle do banco de baterias



Fonte: O autor.

Na equação 6, é obtido o valor do módulo que será a referência para a conversão do fasor da corrente da bateria. Em operação normal, os geradores solar e eólico suprem as cargas. No caso de a corrente fornecida pelos geradores ser maior que a consumida pelas cargas,  $P_{bat}$  será negativo, portanto, a referência para a criação do fasor na fonte de corrente de bateria será negativo e a fonte de corrente estará consumindo corrente, colocando o banco de baterias em carga. No caso da corrente solicitada pelas cargas for

maior que a fornecida pelos geradores,  $P_{bat}$  será positiva, a fonte de corrente das baterias fornecerá potência à micro rede.

$$P_{bat} = Efb * \int P_b dt \quad (6)$$

Na qual:

$P_{bat}$ : Potência fornecida/consumida pelas baterias (kW)

$Efb$ : Eficiência no CEP associado (%)

$P_b$ : Potência demandada pela rede (kW)

Durante as primeiras simulações foi necessário ajustar o bloco, pois a simulação original não interrompia o fornecimento quando o banco de baterias atingia estado de carga igual a zero. Esta condição foi implementada na subseção A, identificada no bloco de controle.

A equação 7 representa a condição inicial  $C_0$  das baterias:

$$C_0 = Ah * ct * \left(1 - \frac{Cbat}{100}\right) \quad (7)$$

Na qual:

$C_0$ : Condição inicial das baterias (%)

$Ah$ : Capacidade nominal do banco de baterias (Ah)

$ct$ : Coeficiente de simulação (h)

$Cbat$ : Carga inicial do banco de baterias (%)

Na subseção B é calculada a carga instantânea do banco de baterias em relação ao estado de carga, considerando a condição inicial do banco de baterias e o consumo ou carga instantâneos. Este cálculo está exposto na equação 8:

$$C_{inst} = \left(C_0 - \int P_{bat} dt\right) * \frac{1}{Ah * ct} \quad (8)$$

Na qual:

$C_0$ : Condição inicial das baterias (%)

$C_{inst}$ : Condição de carga instantânea (%)

$P_{bat}$ : Potência fornecida/consumida pelas baterias (kW)

O estado de carga é calculado pela equação 9 na subseção C:

$$Ec_{bat} = \frac{1 - \int \frac{100 - D_{fbat}}{100} dt}{24 * ct} \quad (9)$$

Na qual:

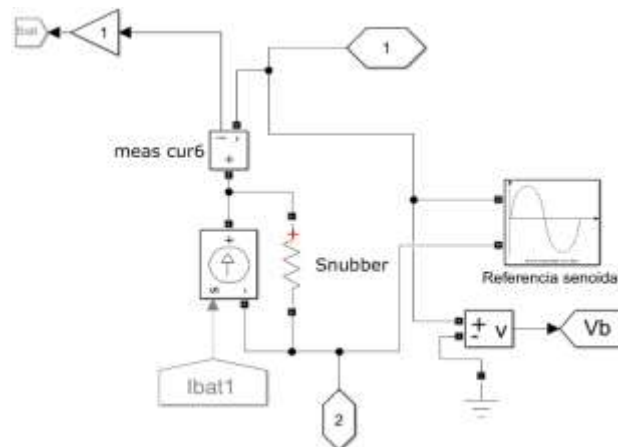
$D_{fbat}$ : Desempenho das baterias ao final da vida útil (%)

$E_{c_{bat}}$ : Estado de carga das baterias (%)

Na subseção D, é realizada uma análise se a corrente do banco de baterias é positiva ou negativa, para determinar se o banco de baterias está em carga ou descarga e esta corrente é integrada para fornecer a informação sobre corrente total fornecida e consumida pelo banco de baterias.

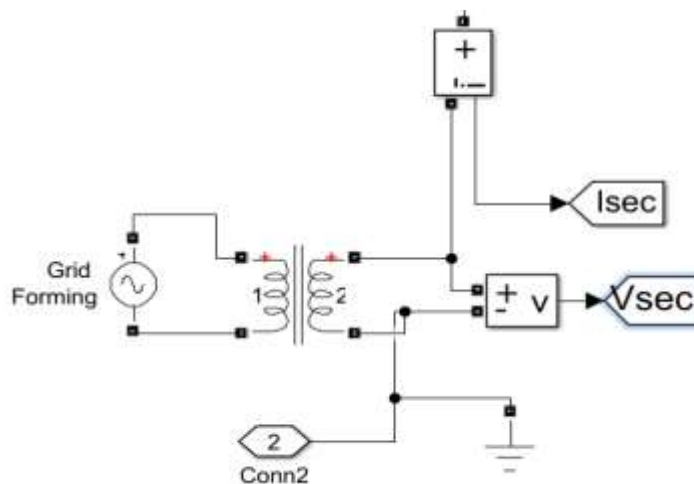
Na subseção E encontra-se a construção do fasor referência para a fonte de corrente referente ao banco de baterias. O sinal de  $I_b$  ( $I_{bat1}$  na Figura 19) fará esta fonte fornecer ou consumir corrente da rede, resultando em situação de carga ou descarga do banco de baterias. A Figura 20 apresenta o bloco de referência senoidal ou “*grid forming converter*”.

Figura 19 - Fonte de corrente do banco de baterias



Fonte: O autor.

Figura 20 - Gerador de referência senoidal



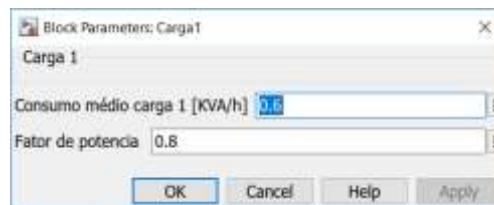
Fonte: O autor.

A fonte de tensão nomeada *Grid Forming* não fornece potência à rede, somente fornecendo um sinal de referência senoidal de 60 Hz (Figura 20), com amplitude de 480 VAC, que foi reduzida para 220 VAC no secundário do transformador.

### 3.4 CARGAS

A micro rede investigada visa suprir comunidades de caráter residencial ou pequenas instalações comerciais, todavia é prevista a inclusão do fator de potência da carga na parametrização, uma vez que residências ou instalações comerciais podem ter cargas não lineares ou ainda motores elétricos. A janela de parametrização está representada na Figura 21.

Figura 21 - Parametrização de carga residencial

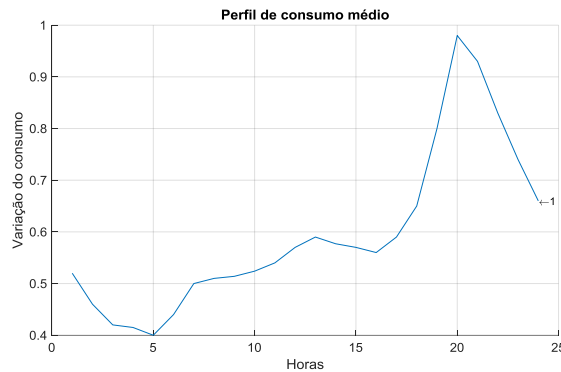


Fonte: O autor.

Buscando conferir às cargas da simulação um comportamento semelhante a consumidores em uma rede de distribuição de energia convencional, foi implementada no ambiente de simulação uma dinâmica para alterar a potência instantânea solicitada pelas cargas. Esta dinâmica reflete como o consumo residencial típico varia ao longo do dia, tendo um aumento gradual do período da manhã até atingir seu pico, próximo das 20 h.

Esta curva de carga residencial típica é disponibilizada por EPE (2020), proveniente de uma nota técnica que apresenta um método desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), para estimar o perfil de consumo das cargas interligadas ao sistema convencional de distribuição. Esta curva está representada na Figura 22:

Figura 22 - Perfil de consumo residencial típico



Fonte: Adaptado de EPE (2020).

Este perfil de consumo é implementado através de um bloco que gera um ganho adimensional obtido através de normalização do perfil de consumo tomando como referência o valor de pico, com o ganho variando entre 0,4 a 1 em função do tempo de simulação. Portanto este ganho será máximo às 20 h, quando o consumo residencial típico atinge seu pico e mínimo às 5 h com o menor consumo instantâneo diário. O ganho é multiplicado pelo consumo nominal da carga informado na parametrização, simulando a variação do consumo no decorrer do dia. O resultado deste cálculo é o módulo de entrada para a construção do fasor que controla o consumo da carga, dado pela equação 10:

$$C_{inst}(t) = C_h * C1_m \quad (10)$$

Na qual:

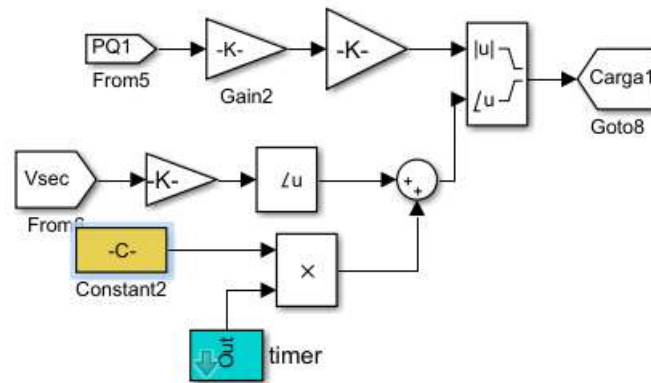
$C_{inst}(t)$ : Consumo instantâneo variando em função do tempo de simulação (kW)

$C_h$ : Ganho instantâneo referente ao valor da carga segundo o perfil de consumo residencial típico

$C1_m$ : Consumo médio da carga (kW)

Na Figura 23 está exemplificado o controle de operação da carga 1. O ganho gerado pela curva de carga é utilizado por todas as cargas separadamente, de modo que é possível configurar várias cargas com diferentes consumos médios.

Figura 23 - Controle da carga 1



Fonte: O autor.

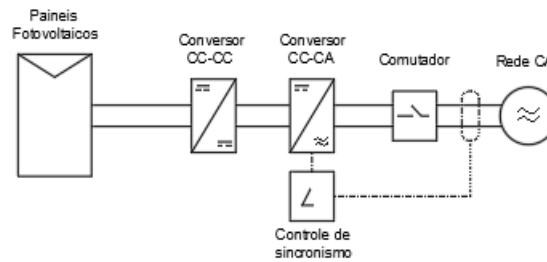
O bloco de controle foi desenvolvido prevendo simular variações repentinas no consumo, porém esta funcionalidade não foi utilizada neste estudo.

### 3.5 INTEGRAÇÃO PARA FORMAÇÃO DA MICRO REDE

A potência gerada pelos painéis fotovoltaicos é convertida e elevada, grande parte dos CEP utilizados comercialmente no país operam na faixa de 600 VDC. A tensão DC é convertida em tensão AC. Esta conversão utiliza como referência um sistema de controle baseado no monitoramento do ângulo de fase da tensão da rede, objetivando um sincronismo com a rede.

O circuito de controle monitora o estado de sincronismo do CEP com a rede, fechando o ponto de conexão quando o sincronismo é atingido. Conversores com capacidade de operar em modo “*grid supporting converter*” citados por BOUZID et al. (2015) são capazes de alterar o ângulo de fase desta onda “convertida”, fornecendo potência reativa à rede. O diagrama básico do CEP associado a geração fotovoltaica está ilustrado na Figura 24.

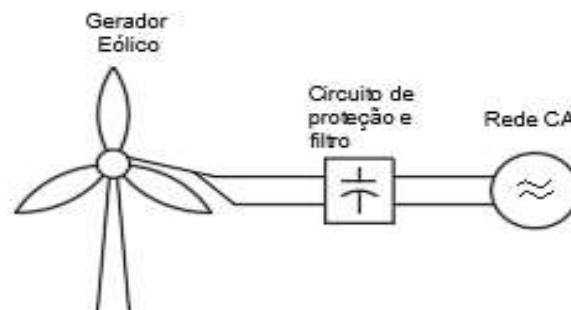
Figura 24 - Diagrama da geração fotovoltaica



Fonte: O autor.

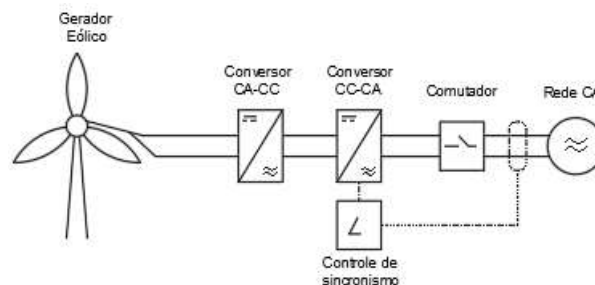
Geradores eólicos, tipicamente, têm em sua saída tensão alternada, podendo passar por processo de filtro da potência gerada e conexão diretamente à rede como na Figura 25, ou ser interligado a sistema mais complexo de conversão de potência, como na Figura 26. Nesta configuração, a tensão alternada gerada é convertida para tensão contínua, para novamente ser convertida para alternada, seguindo o mesmo processo do CEP DC-AC padrão, com o propósito de transformar a tensão da geração em valor adequado para viabilizar o paralelismo com a micro rede. Este processo é capaz de absorver variações nos níveis de tensão e frequência gerador pela turbina eólica, além de fornecer potência ativa e reativa à rede.

Figura 25 - Diagrama da geração eólica sem CEP



Fonte: O autor.

Figura 26 - Diagrama da geração eólica com CEP



Fonte: O autor.

A geração deve ser compatível com a carga instalada somada à energia necessária para funcionamento dos equipamentos, tendo como premissa que toda a energia



necessária por um período de avaliação, seja de um dia ou de um mês, deve ser gerada neste mesmo período. O dimensionamento do sistema de geração é bem difundido e aplicado em diversos estudos, (MOKHEIMER et al, 2014), (LI et al, 2013), (JAYALAKSHMI; GAONKAR, 2011), (GAN ; SHEK; MUELLER, 2015), (ALZHRANI, et al, 2017) e (ALEX, et al, 2014), nos estudos citados foi utilizado, predominantemente, o *software* Homer.

Quando a potência gerada for maior que o consumo, o excedente deve ser armazenado no banco de baterias. No caso de a potência gerada ser inferior à demanda, o suprimento para a rede será garantido pelo uso de banco de baterias, através dos CEP de frequência. Uma arquitetura comprovadamente eficaz é de centralizar toda a geração no banco de baterias, conforme o estudo realizado por Ribeiro et al. (2010).

A centralização da geração para realizar a carga das baterias foi determinada visando minimizar efeitos indesejáveis ao associar diferentes geradores operando em AC, ou seja, aplicações onde a fonte solar está conectada a um conversor, o gerador eólico gerando em AC e o banco de baterias também com seu CEP associado. A medida em que a geração decresce, os CEP associados a geração fotovoltaica tendem a ter perda de potência, seja ao anoitecer ou por cobertura dos painéis por nuvens. Geradores eólicos podem sofrer perturbações na geração por quedas repentinas na velocidade do vento ou de rajadas esporádicas, causando picos de geração, afetando a tensão e frequência da rede (Ribeiro et al., 2010).

Em uma micro rede como a proposta neste estudo, tensão e frequência do barramento são controlados somente pela associação de CEP em método “*droop*”. A capacidade de operar em “*droop*” é uma funcionalidade dos CEP modernos, nesta configuração estes CEP são alimentados pelo banco de baterias. Os geradores solar e eólico são associados a um sistema de conversão para a potência gerada ser fornecida em tensão contínua para o banco de baterias. O controle de carga do banco de baterias deve ser provido de sistema de rejeição de carga, para no caso de ter atingido 100 % de carga, ocorre o seccionamento entre o sistema de geração e de armazenamento.

O banco de baterias e os CEP devem estar fisicamente próximos, devido a corrente de saída do banco de baterias ser possivelmente elevada. Os níveis de corrente variam em função da tensão de trabalho escolhida e esta opção é em função de dimensionamento do banco, da tecnologia disponível e de demais fatores relacionados a compra e especificação.

Nesta investigação trata-se somente do conceito de que o armazenamento e conversão devem estar próximos para segurança das instalações e economia com cabos de potência, além de otimização de operação e manutenção. Caso sejam necessário equipamentos adicionais de conversão associados aos geradores, estes também devem estar na mesma instalação física, em uma sala de equipamentos dedicada.

O modelo de micro rede investigado foi integrado em um ambiente de simulação desenvolvido no *Simulink*. A simulação foi concebida para receber parâmetros de entrada básicos sobre a micro rede pretendida, as cargas a serem instaladas, tensão de operação dos equipamentos e recursos energéticos disponíveis. Através da simulação é possível verificar, por exemplo, a corrente de carga e descarga do banco de baterias em diferentes condições de operação e período do dia, facilitando o dimensionamento e otimizando o sistema ainda em fase de projeto.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo foi apresentada a topologia de micro rede investigada para atendimento de comunidades isoladas. O projeto da micro rede tem como premissa a não utilização de geradores a combustão, portanto o dimensionamento do sistema de armazenamento é elemento chave para garantir o suprimento de energia aos consumidores em situações de falta de recurso energético solar e eólico.

A utilização de uma simulação em MATLAB viabilizou uma simulação de operação de uma micro rede com parâmetros reais de operação, com a capacidade de realizar testes com diferentes configurações no sistema de geração e armazenamento, a fim de verificar a interação da energia gerada e consumida ao longo do período simulado.

A parametrização do sistema de geração e armazenamento pôde ser realizada considerando efetivamente os equipamentos que irão compor a micro rede, utilizando critérios relacionados ao dimensionamento de sistemas de geração e armazenamento, como tensão de trabalho, quantidade de elementos, corrente nominal dos equipamentos entre outros, facilitando a parametrização para a condução de simulações em diferentes cenários. A integração da micro rede investigada em um ambiente de simulação como o MATLAB fornece dados concretos para conduzir o estudo da aplicação de micro redes ao possibilitar um dimensionamento confiável do sistema de geração e armazenamento, além de permitir visualizar a operação e interação dos elementos da micro rede ao longo do tempo.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

A modelagem e simulação em ambiente *Simulink/MATLAB* foi desenvolvida para ser configurável, de maneira que possa ser ajustada para simular sistemas de geração implantados em diferentes localidades, com topologias e características de operação distintas.

Para aprimorar a investigação do funcionamento da micro rede investigada, a fim de avaliar e ajustar os parâmetros de projeto, foram criados cenários que representam situações normais com variações da geração e consumo simulados. Cenários críticos também foram avaliados, em especial os que tratam de elevada demanda por potência elétrica na micro rede em momentos prolongados de geração incipiente, obrigando recorrer a energia proveniente dos acumuladores, que armazenam a energia necessária nestes momentos de déficit energético. Tais cenários foram simulados na ferramenta de simulação descrita no capítulo 3.

Adicionalmente, buscando validação da ferramenta de simulação, na seção 4.1 é apresentada uma comparação entre a operação de um sistema de geração fotovoltaica simulado na ferramenta, considerando uma aplicação real e utilizando a mesma base de dados, e os dados reais obtidos de um projeto de geração fotovoltaica *on-grid*, implementado na cidade de Curitiba-PR.

Na seção 4.2 é apresentada a funcionalidade principal da aplicação da ferramenta de simulação, apresentando exemplos de sua aplicação: dimensionamento e análise de operação de micro redes isoladas de geração e consumo. São conduzidas simulações em cenários hipotéticos de uma micro rede instalada no município de Jandaíra. As subseções 4.2.2 e 4.2.3 apresentam variações de um cenário inicial utilizado para dimensionamento inicial da micro rede e as subseções 4.2.4 a 4.2.7 contém diferentes cenários de simulação anual.

### 4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Durante o desenvolvimento do estudo foi identificada uma maneira de comparar o método de parametrização e dimensionamento de sistemas de geração implementado no ambiente *Simulink/MATLAB*.

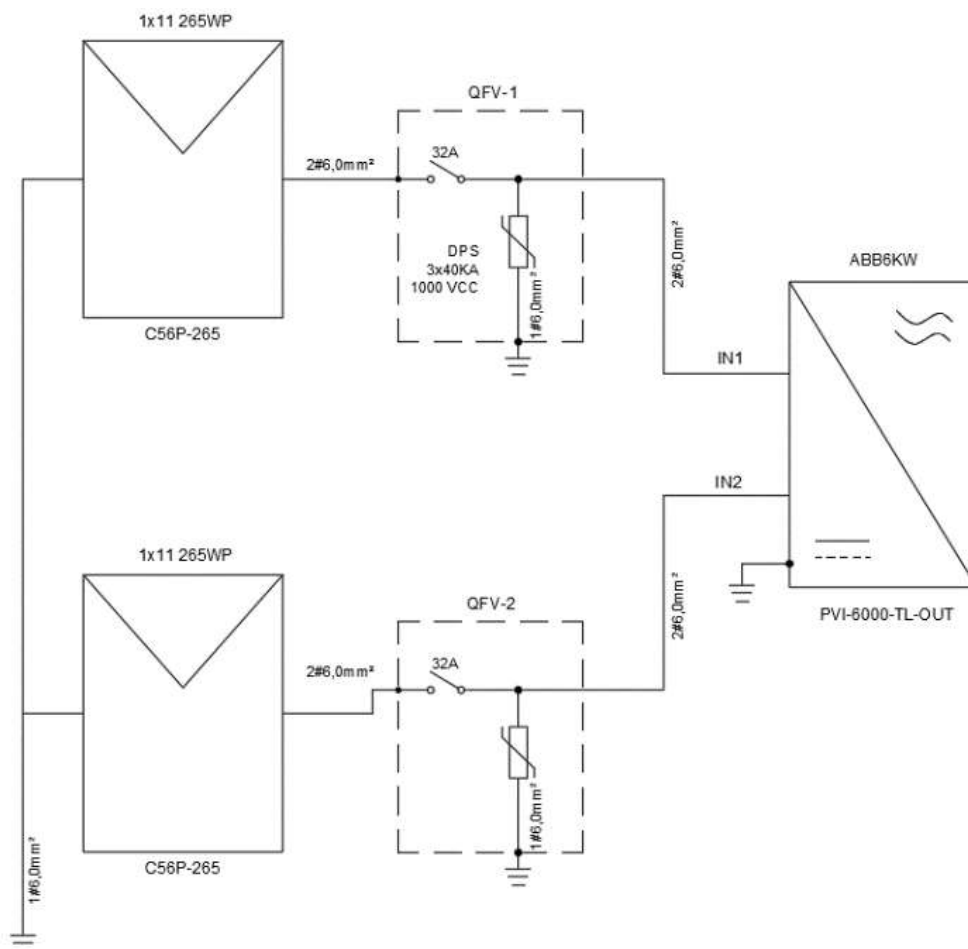
O método convencional de dimensionamento de sistemas de geração distribuída fotovoltaica considera a média mensal da irradiação global para a localidade, focando

nos valores totais de energia gerada, normalmente apurados mensalmente (VILLALVA, 2015), (PEREIRA, 2017), (PINHO; GALDINO, 2014).

O sistema de geração fotovoltaica residencial da Figura 27, instalado no município de Curitiba-PR, foi dimensionado pela aplicação do método convencional, composto por:

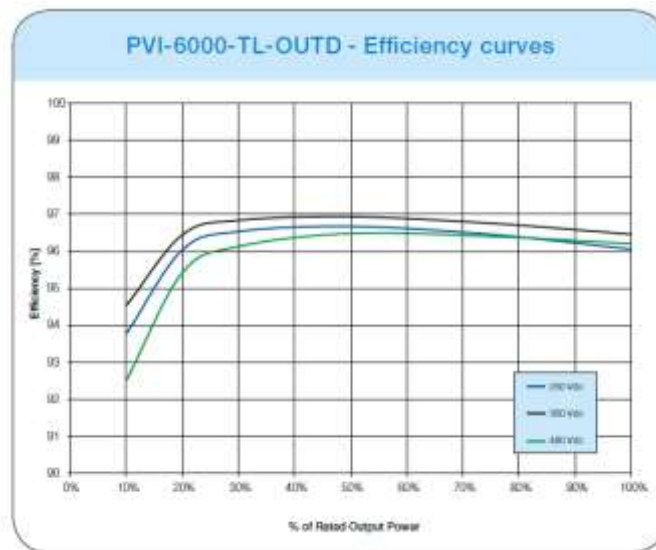
- 22 painéis de geração fotovoltaica, modelo CS6P 265 W do fabricante Canadian Solar, área útil de 1,48 m<sup>2</sup>, eficiência de 16,47 %, tensão de geração de 27,9 V, corrente de geração de 6,88 A e potência de pico gerada de 192 W (SOLARIS, 2020);
- CEP modelo PVI-6000-TL, fabricante ABB, potência máxima de geração de 6 kW, tensão máxima de entrada de 600 V, eficiência média de 96,5 % disponível na Figura 28 (ABB, 2019).

Figura 27 - Diagrama elétrico de gerador fotovoltaico residencial



Fonte: O autor.

Figura 28 - Curvas de eficiência CEP

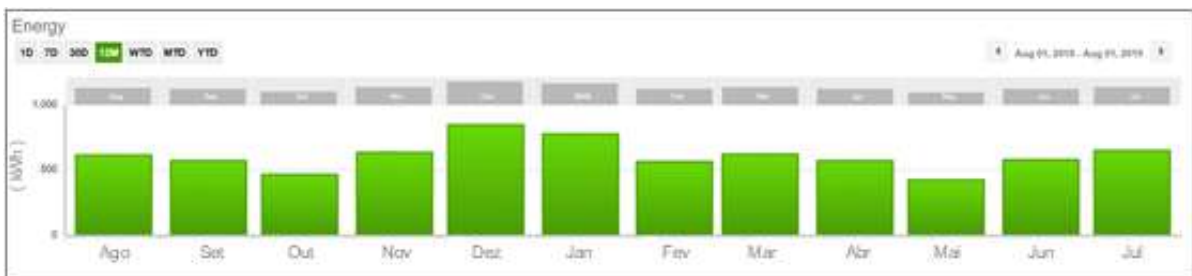


Fonte: ABB (2019).

O projeto de geração fotovoltaica foi instalado utilizando um CEP com a funcionalidade de exportar dados sobre a geração via *Wi-Fi*, capaz de disponibilizar dados em tempo real, além de armazenamento de histórico (ABB, 2019).

A energia gerada pelo CEP pode ser consultada *on-line*, em ambiente *web* disponível em VISION (2019) e visualizado na Figura 29:

Figura 29 - Energia gerada entre agosto/18 a agosto/19



Fonte: VISION (2019).

A geração mensal pode ser visualizada, em kWh, na Tabela 8:

Tabela 8 - Geração mensal do CEP ABB entre agosto/18 a agosto/19

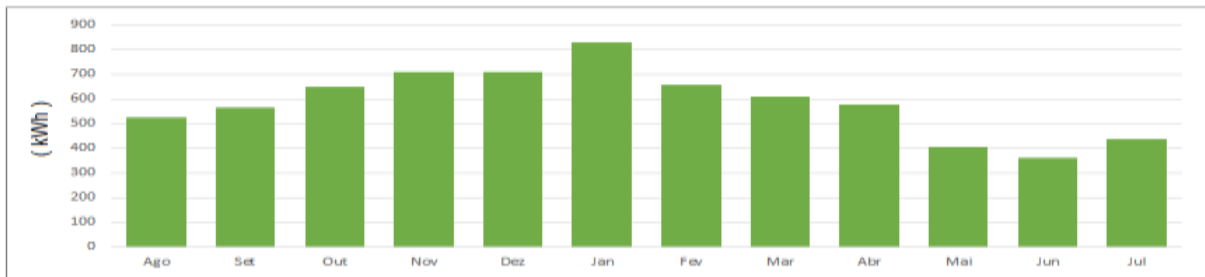
Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai	Jun.	Jul.
613	570	464	635	844	771	561	620	570	422	578	648

Fonte: O autor.

Os valores apresentados referem-se, como dito, a um sistema de geração fotovoltaica em plena operação na cidade de Curitiba-PR.

Posteriormente ao levantamento dos dados e características de projeto, a simulação foi parametrizada, tendo como dados de entrada a irradiação global com variação horária, além da temperatura, conforme disponibilizado por Crawley e Lawrie (2019). A Figura 30 apresenta a geração obtida pela simulação.

Figura 30 - Geração fotovoltaica ago-18 a jul-19



Fonte: O autor.

O sistema de geração fotovoltaica foi alimentado com a área total equivalente aos 22 painéis geradores e a eficiência de conversão e a eficiência do CEP. Com a realização de simulação de 8760 h (1 ano), foi coletada a geração simulada mensal, demonstrada na Tabela 9:

Tabela 9 - Geração em kWh simulada entre agosto/18 a agosto/19

Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai	Jun.	Jul.
523	565	649	708	710	830	657	607	577	403	361	436

Fonte: O autor.

A Tabela 10, apresenta a diferença entre a geração real e a energia estimada no ambiente de simulação com o uso da ferramenta desenvolvida. A energia total obtida através da simulação foi de 7.026 kWh em um ano, enquanto a geração real registrada pelo CEP da ABB foi de 7.296 kWh. obtida na simulação no período anual analisado foi de 270 kWh (3,7 % da energia total gerada no período observado).

Tabela 10 - Diferença entre geração real e simulada entre agosto/18 a agosto/19

	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai	Jun.	Jul.
Erro (kWh)	59	96	-13	7	-19	-217	-212	-90	-5	185	73	-134
Erro (%)	7,6	17	-2,1	1,2	-4,5	-37	-32	-14	-0,9	39	11	-15

Fonte: O autor.

Uma possível causa para a diferença entre a geração real e simulada durante os meses de verão pode ser a alta incidência de chuva nesta época do ano e longos períodos com irradiação solar atenuada pela presença de nebulosidade.

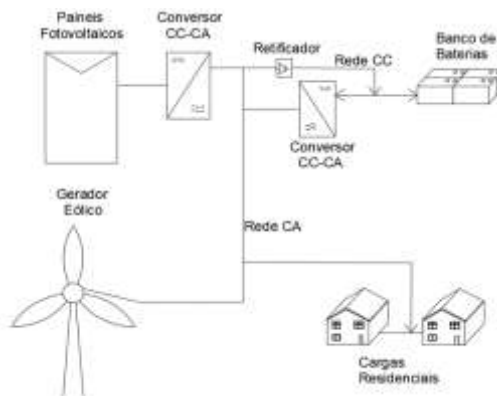
O sistema de geração residencial está interligado a rede de distribuição, desta maneira quando não existe geração fotovoltaica, as cargas são alimentadas pela rede. Portanto a comparação entre um sistema real e uma simulação utilizando a ferramenta em MATLAB se restringe à geração fotovoltaica de energia, considerando o conceito de dimensionamento do sistema e utilização das fontes de dados do recurso energético disponível.

As análises de queda de tensão, consumo de potência reativa, potência total consumida, geração eólica e sistema de armazenamento não são aplicáveis nesta simulação.

## 4.2 SIMULAÇÃO EM CENÁRIOS

Todos os cenários de simulação são conduzidos tomando como referência o município de Jandaíra. A Figura 31 ilustra a micro rede configurada na simulação em cenários.

Figura 31 - Micro rede aplicada aos cenários



Fonte: O autor.

A definição dos cenários considerou as características técnicas e operacionais de redes de distribuição residencial, porém devem ser passíveis de implementação no *software* de simulação.

Portanto a escolha dos cenários é parte integrante do estudo, no sentido de direcionar o modelo para determinada necessidade.

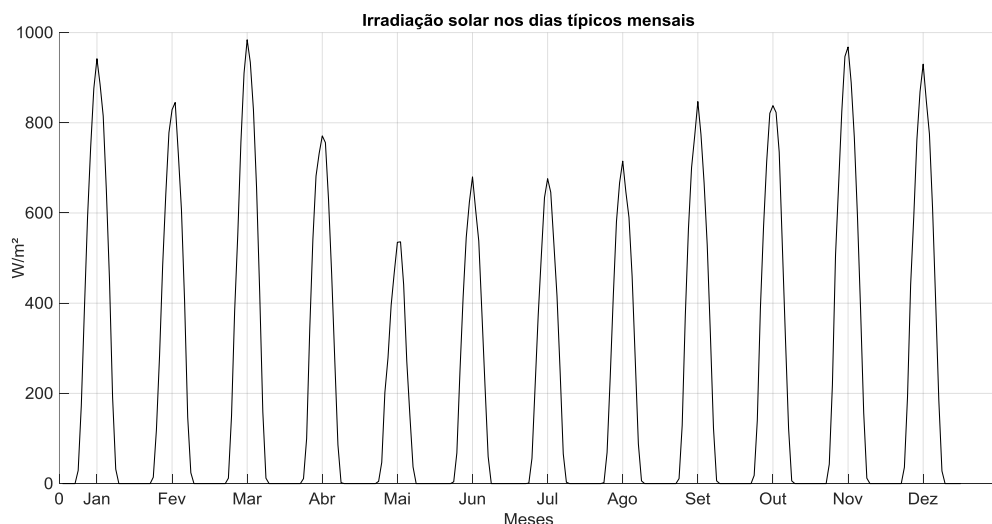
#### 4.2.1 Parametrização básica do ambiente de simulação

Para definir os dados de entrada que alimentam o ambiente de simulação foi necessário realizar levantamento de fontes que forneçam as informações referentes aos recursos energéticos disponíveis, do contrário seriam necessárias medições locais para determinar a irradiação solar e velocidade do vento. Foram identificadas na internet as base de dados disponibilizadas por Goddard Space Flight center (2017), NOAA (2020) e Meteo-France (2018). Estas fontes contém dados climáticos e ambientais de todo o planeta disponibilizadas gratuitamente, porém não apresentam valores instantâneos com passo de variação dos dados em base horária, logo não eram a melhor opção para a condução das simulações propostas.

A parametrização dos cenários de simulação discutidos nesta seção será realizada utilizando os dados ambientais disponibilizados por Crawley e Lawrie (2019) e o perfil de consumo residencial típico (EPE, 2020), considerando a localidade de Jandaíra.

Na Figura 32 é apresentada a irradiação solar média de cada mês do ano, considerando a irradiação medida de hora em hora e calculando a média dos valores para o mesmo horário durante o mês em questão, obtendo um dia típico mensal (CRAWLEY; LAWRIE, 2019).

Figura 32 - Irradiação solar dos dias típicos mensais

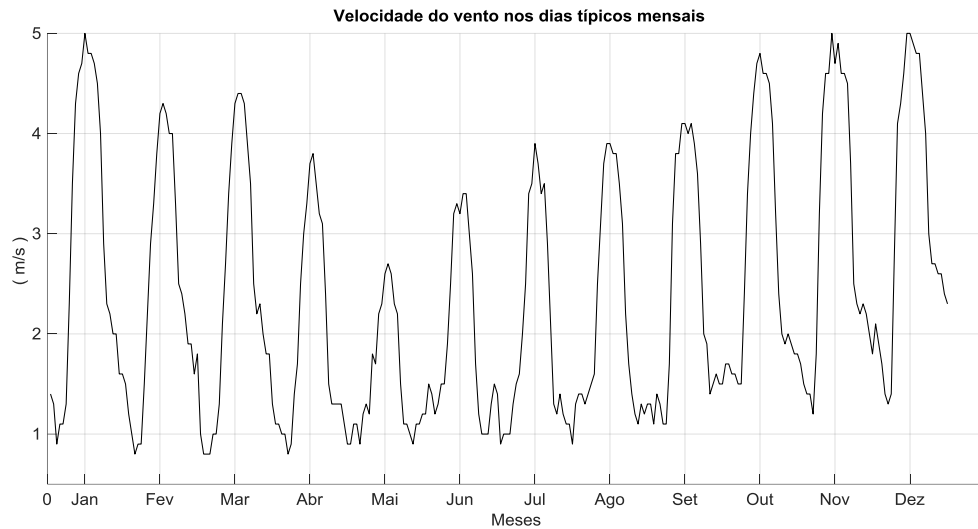


Fonte: Adaptado de Crawley e Lawrie (2019).

Na Figura 33 é apresentada a média mensal da velocidade do vento, aplicando o conceito dos dias típicos mensais.



Figura 33 - Velocidade do vento nos dias típicos



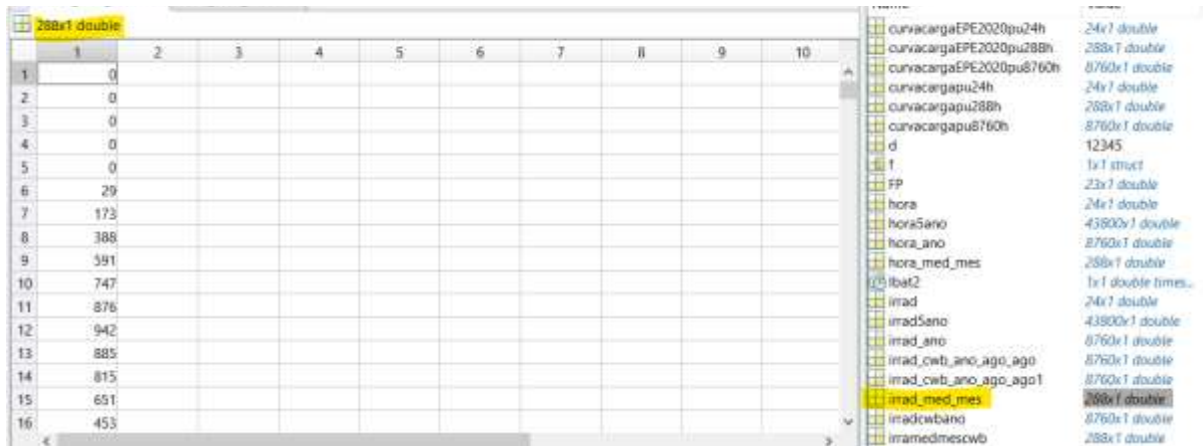
Fonte: Adaptado de Crawley e Lawrie (2019).

A Figura 32 e a Figura 33 são formas de representação dos dados ambientais referentes aos recursos energéticos disponíveis que devem ser configurados na ferramenta de simulação para caracterizar a localidade objeto de estudo.

A ferramenta de simulação foi desenvolvida com o objetivo de ser replicada para outras regiões e localidades, para tanto é imprescindível uma adaptação para adequar o ambiente de simulação para o novo cenário. Inicialmente é necessário importar os dados ambientais para o *Workspace* do MATLAB, criando uma variável do tipo “vetor”.

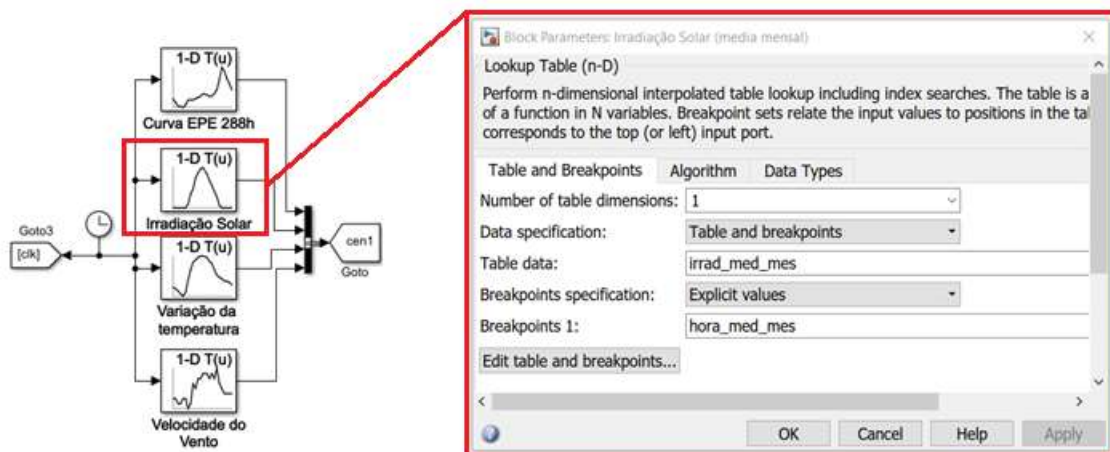
Os valores que podem ser visualizados nas linhas da “planilha” da Figura 34 são os valores de irradiação solar instantânea. Estes dados são para condução de simulação em 288 horas, logo o vetor criado tem 288 elementos. Adicionalmente é necessário criar um segundo vetor, representando a variação temporal desejada para a simulação, este novo vetor deve conter os valores de 1 a 288 que representa o período da simulação desejada.

Figura 34 - Importação de dados ambientais para o MATLAB



Fonte: O autor.

Em seguida é utilizado um bloco pré-existente do *Simulink* chamado de *Lookup Table*. A Figura 35 apresenta o bloco que deve ser configurado com a variável recém criada: os dados de irradiação são inseridos no campo “*Table data*”, no campo “*Breakpoints*” é inserida a variável com os valores de evolução do tempo de simulação, neste caso o vetor com valores de 1 a 288. Esta configuração cria uma tabela de irradiação solar instantânea em função do tempo, com 288 pontos no eixo do tempo, em horas.

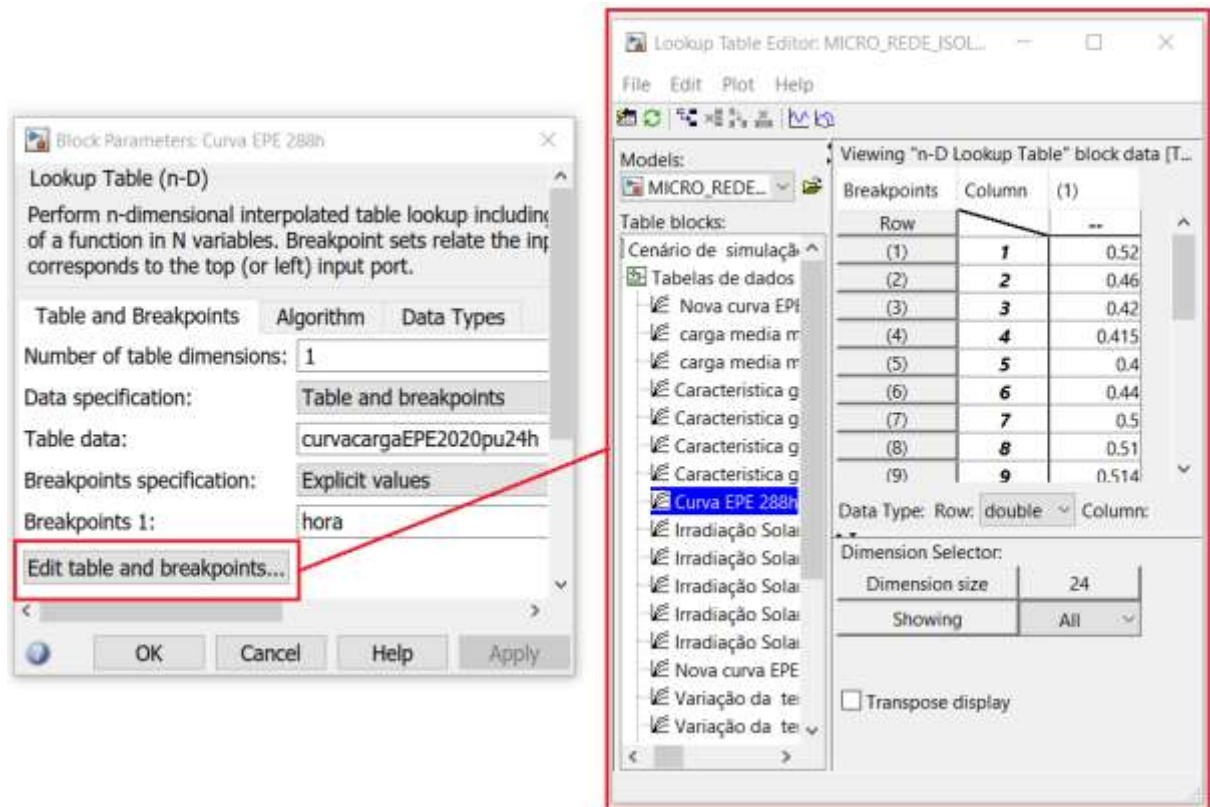
Figura 35 - Configuração do bloco *Lookup Table* com dados de irradiação solar

Fonte: O autor.

Na Figura 35 são visualizados blocos “*Lookup Table*” referentes aos dados da velocidade do vento, temperatura e também a curva que simula o perfil de consumo residencial. Todos estes blocos devem ser reconfigurados com os dados ambientais do

local objeto de estudo, além de ser possível alterar o perfil de consumo através do botão “*Edit table and breakpoints*”, apresentado na Figura 36. Assim é possível alterar rapidamente a curva gerada pelo bloco, visualizando a nova curva através do menu “*Plot*” da janela de edição “*Lookup Table Editor*”.

Figura 36 - Edição de uma *Lookup Table*



Fonte: O autor.

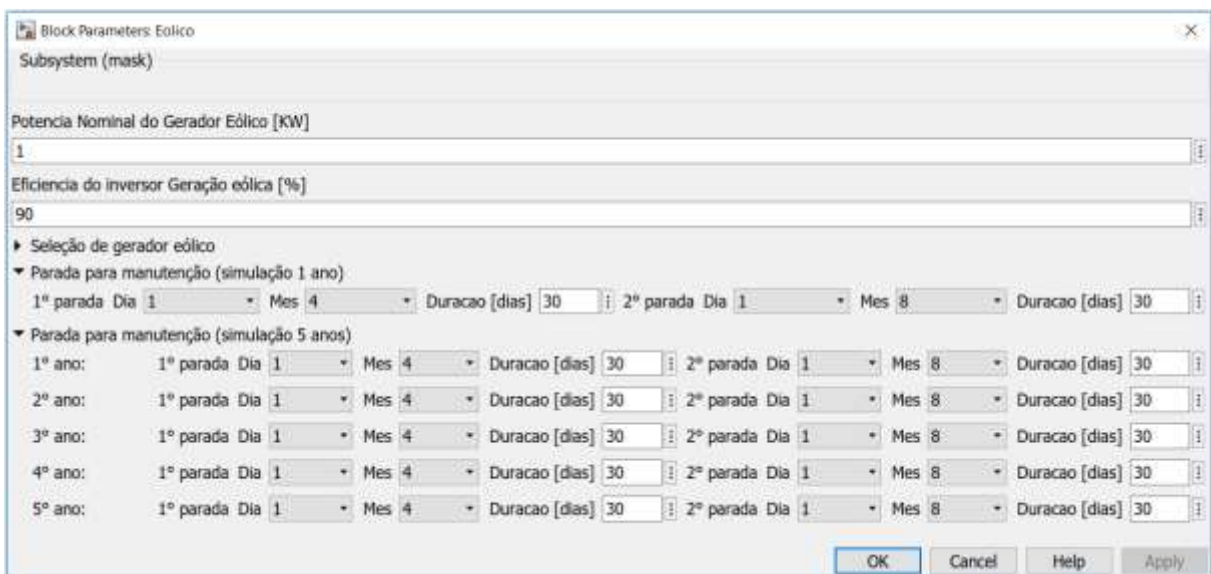
A configuração dos cenários de simulação com um ano de duração seguem o mesmo procedimento, com a única diferença que as variáveis criadas no *Workspace* terão 8760 elementos, correspondendo ao período da simulação, em horas. Maiores detalhes sobre a criação, funcionamento e as bibliotecas de blocos pré-existentes no *Simulink* podem ser encontradas em Mita (2018) e Sizemore e Mueller (2016).

Durante os testes de funcionamento da ferramenta de simulação foi observado que a análise de um período de 288 horas fornecia um bom cenário para um dimensionamento inicial das capacidades de geração e armazenamento, porém para maior assertividade na condução da parametrização, foram necessários dados mais realistas, afinal a média mensal poderia suprimir dias com baixas condições de geração.

Neste sentido foi definido que seria realizada uma simulação com os dados variando em base horária, em um período de um ano. Essa simulação é fundamental para assegurar que o fornecimento de energia será mantido durante a noite e situações com baixa velocidade de vento. O funcionamento do banco de baterias pode ser observado com mais critério neste cenário.

Na ferramenta de simulação foi prevista a eventual necessidade de realizar simulações a longo prazo, em um período de 5 anos. Na parametrização deste tipo de simulação foi criada a possibilidade de estipular interrupções programadas na geração, chamadas de paradas para manutenção. A Figura 37, apresenta a interface de configuração, com o período de duração da parada e seu início. Esta funcionalidade pode ser alterada conforme necessidade do cenário a ser analisado, porém não foi utilizada nos cenários hipotéticos discutidos neste trabalho.

Figura 37 - Parametrização da parada para manutenção



Fonte: O autor.

A simulação em um horizonte de 5 anos é capaz de apresentar, a longo prazo, o comportamento do banco de baterias, que é a chave para manutenção da autonomia da micro rede, uma vez que é possível visualizar o efeito da queda de rendimento dos elementos de armazenamento de energia.

## 4.2.2 Cenário 1: geração fotovoltaica em dias típicos

### 4.2.2.1 Descrição do cenário

Neste cenário será simulada uma micro rede com geração exclusivamente fotovoltaica associada a um banco de baterias para armazenamento de energia. O período de simulação foi definido em 288 horas, na qual é considerada um dia típico de cada mês considerando o valor médio mensal dos dados ambientais (irradiação global e variação de temperatura). O primeiro dia típico da simulação é referente a janeiro, encerrando em dezembro.

Este cenário de simulação considera um dia típico de cada mês do ano. Este dia típico é referente a média dos dados ambientais ao longo do mês, para determinada variável e horário, objetivando fornecer um cenário com comportamento mais dinâmico da micro rede. A simulação será conduzida considerando um cenário de operação ideal, sem paradas para manutenção, perdas de geração atípicas ou interrupções de fornecimento as cargas. O sistema de armazenamento configurado no cenário 1 é mostrado na Figura 39, neste cenário foi considerada uma autonomia de 1 dia para o banco de baterias.

Para a parametrização da geração fotovoltaica mostrada na Figura 38, foi utilizado o painel solar do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U descrito na Tabela 1 disponibilizada na seção 2.2.

Figura 38 - Parametrização da geração fotovoltaica do cenário 1

Parameter	Value
Numero de paineis fotovoltaicos [un]	22
Area painel fotovoltaico [m <sup>2</sup> ]	1.94
Eficiencia painel fotovoltaico [%]	16.19
Eficiencia do inversor fotovoltaico [%]	90
Coeficiente de perda por temperatura [%/°C]	-0.41
Temperatura de referência [°C]	25

▶ Parada para manutenção (simulação 1 ano)  
▶ Parada para manutenção (simulação 5 anos)

Fonte: O autor.

Figura 39 - Parametrização do banco de baterias cenário 1

Fonte: O autor.

As cargas alimentadas neste cenário são consideradas estritamente residências, considerando três residências com consumo e fator de potência distintos. A parametrização das cargas é mostrada na Figura 40.

Figura 40 - Parametrização das cargas

Fonte: O autor.

As cargas, ainda que residenciais, podem apresentar necessidade de fornecimento de potência reativa. A ferramenta de simulação permite configurar um fator de potência para cada carga e apresenta a potência reativa total demandada pela carga. Esta informação pode ser utilizada para auxiliar na especificação dos equipamentos de conversão utilizados na micro rede.

Com o cenário definido e parametrizado, pode ser conduzida a simulação e coletados dados considerados relevantes para a análise referente ao dimensionamento e comportamento da micro rede em situação ideal, considerando a operação da micro rede durante um dia típico de cada mês. Foram coletadas na ferramenta de simulação: a potência gerada pela fonte fotovoltaica; a transferência de potência para referente aos ciclos de carga e descarga do banco de baterias; o estado de carga do sistema de armazenamento; o desempenho estimado das baterias e a tensão final nos consumidores.

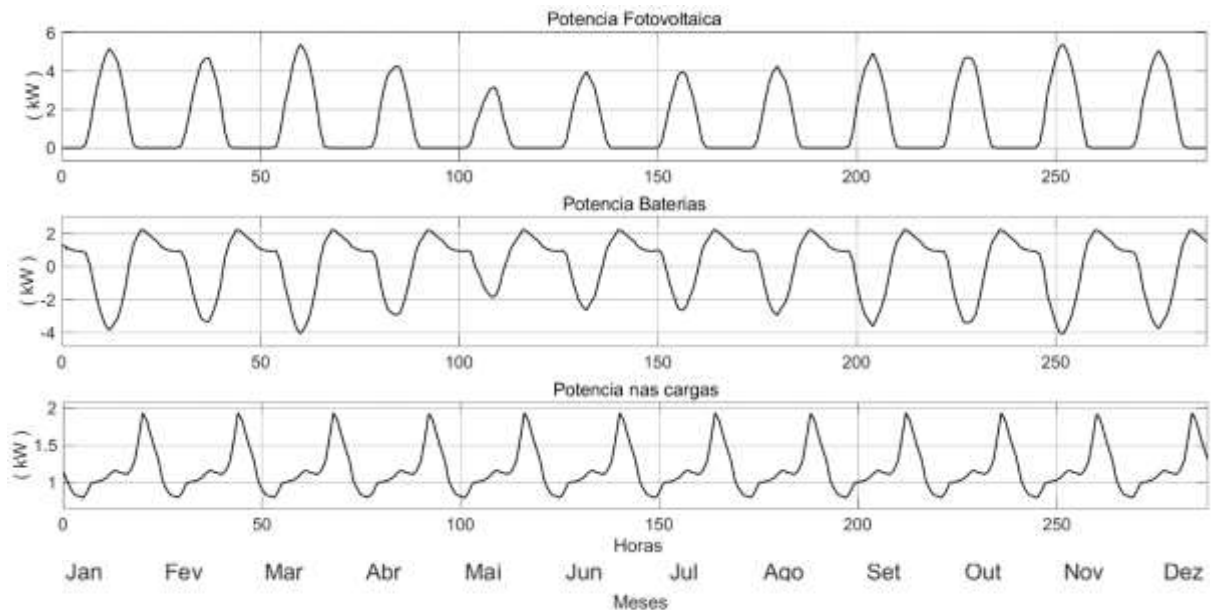
#### **4.2.2.2 Resultados e análises**

Na Figura 41 é mostrada a potência instantânea fornecida pela geração fotovoltaica no primeiro gráfico. É possível observar uma queda na geração fotovoltaica durante os meses de inverno. Também é interessante observar a interação entre a geração fotovoltaica e o regime de operação do banco de baterias que quando está em carga tem comportamento similar a um consumidor de potência elétrica e quando ocorre falta na geração fotovoltaica atua como fonte geradora de potência, além de condições em que a potência gerada pelas fontes primárias não atende à demanda das cargas.

A transferência de potência para o sistema de armazenamento indica a situação de operação dele. Quando é negativa, ocorre a carga das baterias, nas situações em que a potência é positiva, o banco de baterias fornece potência à micro rede. É de fácil identificação o regime de carga e descarga das baterias ao considerar o período em que a geração fotovoltaica vai a zero, durante a noite.

Nota-se que a potência fornecida às cargas não é alterada, uma vez que a queda de geração é compensada com o fornecimento de potência pelo sistema de armazenamento.

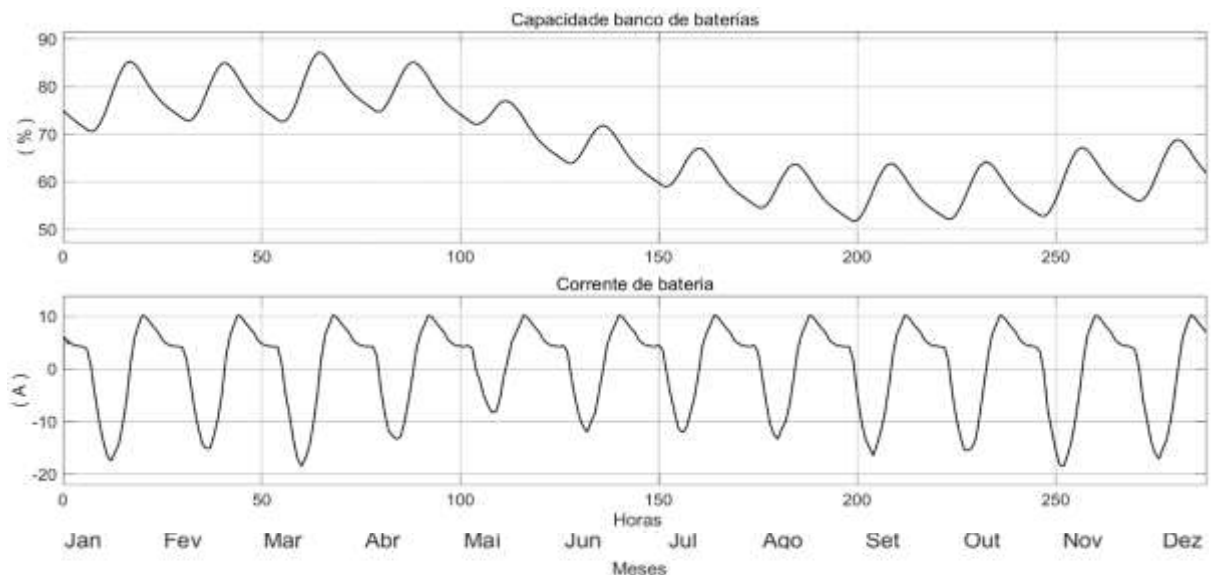
Figura 41 - Potência total gerada e consumida FV+BAT no cenário 1



Fonte: O autor.

Na Figura 42 é mostrado o estado de carga do banco de baterias e a variação da corrente. Valores de corrente negativos indicam que as baterias se comportam como cargas entrando em carregamento, valores positivos sinalizam que as baterias estão fornecendo potência à rede. No cenário de 288 h, é possível visualizar o comportamento dinâmico do banco de baterias ao longo do dia, observando a amplitude da oscilação do fornecimento e consumo é possível verificar se a profundidade de descarga irá extrapolar os limites sugeridos pelos fabricantes, por exemplo.

Figura 42 - Estado de Carga das Baterias cenário 1

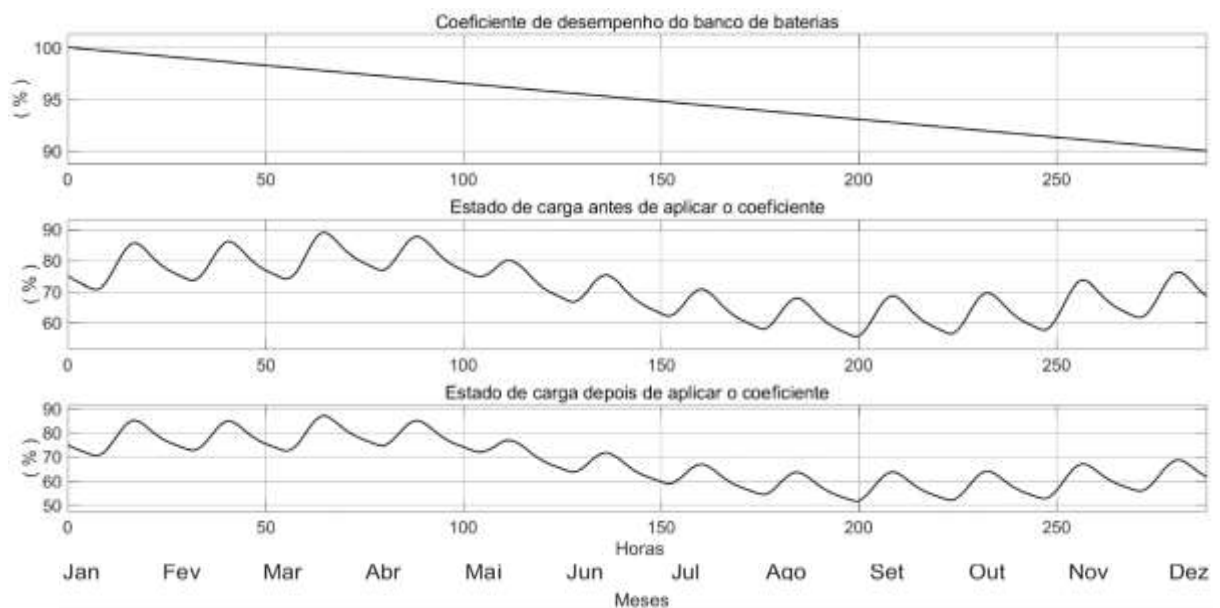


Fonte: O autor.



A Figura 43 apresenta um conceito fundamental que deve ser considerado na fase de projeto e dimensionamento do sistema de armazenamento, a perda de eficiência das baterias. Na fase de parametrização é informada a fração da carga original que a bateria irá ser capaz de armazenar quando atingir o final de seu tempo de vida útil, além do período de vida útil estimado.

Figura 43 - Desempenho das baterias cenário 1



Fonte: O autor.

No primeiro gráfico da Figura 43 está explícito a queda de rendimento das baterias, atingindo uma capacidade de no máximo 90 % de sua capacidade nominal inicial após um ano de operação.

O segundo gráfico apresenta o estado de carga das baterias sem a aplicação da queda de rendimento no período. Observando o estado de carga das baterias, se faria a inferência errônea de que o sistema de geração está sobre dimensionado, uma vez que o estado de carga apresentou tendência de crescimento constante.

Enquanto no terceiro gráfico o estado de carga é influenciado pela perda de capacidade de acúmulo de energia nas baterias, devido ao desgaste natural dos elementos de armazenamento. Ao considerar a queda de rendimento, é possível ajustar o dimensionamento do sistema de geração ao considerar o comportamento esperado do banco de baterias, considerando condições reais de operação ao longo de tempo.

## 4.2.3 Cenário 2: geração fotovoltaica e eólica em dias típicos

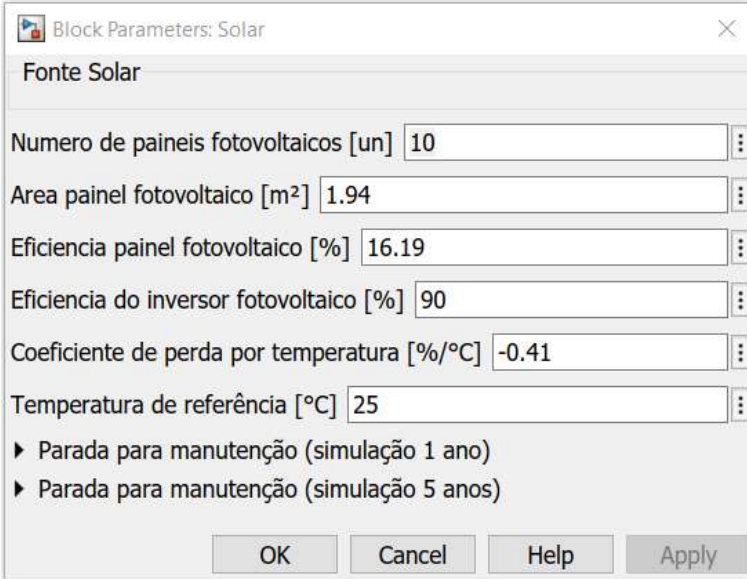
### 4.2.3.1 Descrição do cenário

Este cenário de simulação considera o mesmo parâmetro de tempo de simulação apresentado no cenário 1, porém com a inclusão de gerador eólico, considerando um cenário ideal de operação.

Além da inclusão de gerador eólico, neste cenário foi redimensionado o gerador fotovoltaico do cenário 1 para adequar a potência total gerada, considerando a adição da fonte eólica.

No cenário 2, o sistema de geração fotovoltaica foi parametrizado conforme a Figura 44. Neste cenário o número total de painéis fotovoltaicos foi reduzido. Os parâmetros relacionados ao banco de baterias e as cargas não foram alterados (em relação ao cenário 1). O painel solar utilizado também é do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U descrito na Tabela 1 disponibilizada na seção 2.2.

Figura 44 - Geração fotovoltaica da micro rede híbrida do cenário 2



Parâmetro	Valor
Numero de paineis fotovoltaicos [un]	10
Area painel fotovoltaico [m²]	1.94
Eficiencia painel fotovoltaico [%]	16.19
Eficiencia do inversor fotovoltaico [%]	90
Coeficiente de perda por temperatura [%/°C]	-0.41
Temperatura de referência [°C]	25

- ▶ Parada para manutenção (simulação 1 ano)
- ▶ Parada para manutenção (simulação 5 anos)

Fonte: O autor.

O gerador eólico foi parametrizado conforme a Figura 45:

Figura 45 - Gerador eólico do cenário 2

Block Parameters: Eolico

Subsystem (mask)

Potencia Nominal do Gerador Eólico [KW]  
3

Eficiencia do inversor Geração eólica [%]  
100

Altura de medição da velocidade do vento [m]  
10

Altura de instalação do aerogerador [m]  
20

▶ Seleção de gerador eólico

▶ Parada para manutenção (simulação 1 ano)

▶ Parada para manutenção (simulação 5 anos)

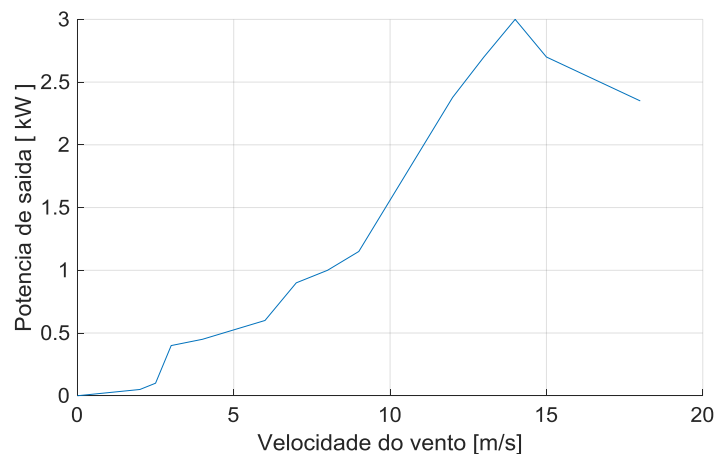
OK Cancel Help Apply

Fonte: O autor.

Além da parametrização do sistema de geração eólica, foi determinado o gerador eólico utilizado, considerando sua curva característica de geração, na Figura 46.

Com esta configuração admite-se que o parque gerador eólico seria composto por três geradores do modelo EcoSolar 1k.

Figura 46 - Curva Característica do aerogerador EcoSolar 1K

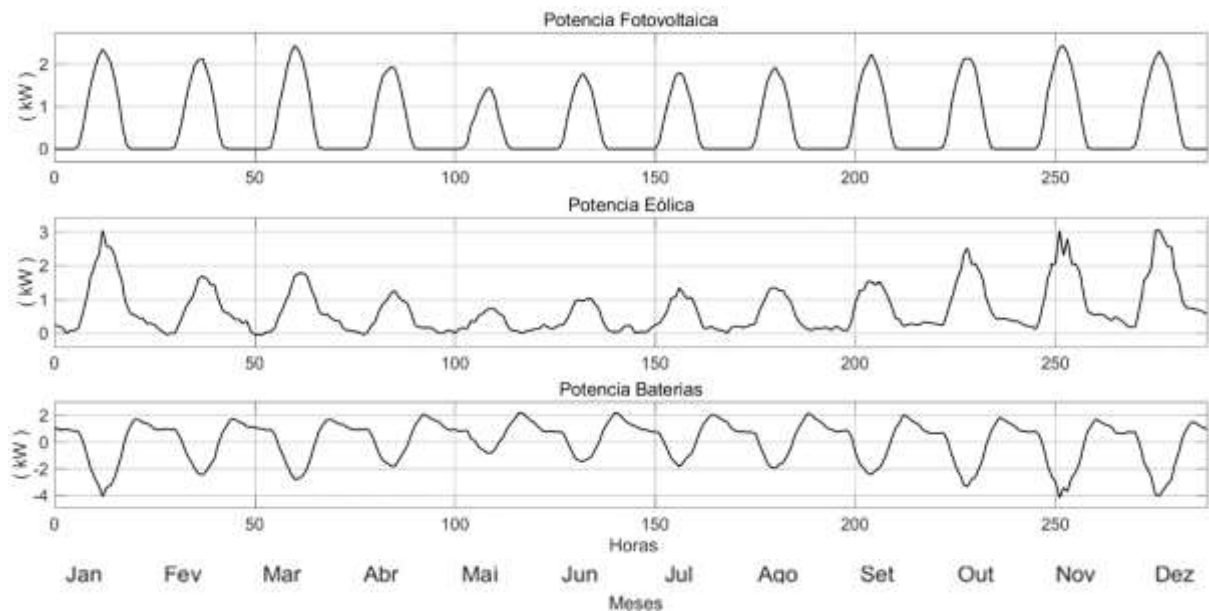


Fonte: Adaptado de Solar (2020).

### 4.2.3.2 Resultados e análises

Na Figura 47 é possível constatar que o pico de geração eólica coincide com os picos de geração fotovoltaica. Esta característica demonstra que, na região analisada (município de Jandaíra), as fontes eólica e solar não são complementares. Portanto, apesar da utilização de duas fontes de energia distintas, neste cenário foi utilizada a mesma capacidade de armazenamento, porém a diversificação das fontes de energia garante maior segurança energética em caso de queda temporária de geração, neste caso, o fornecimento às cargas não ficará totalmente sob responsabilidade do banco de baterias.

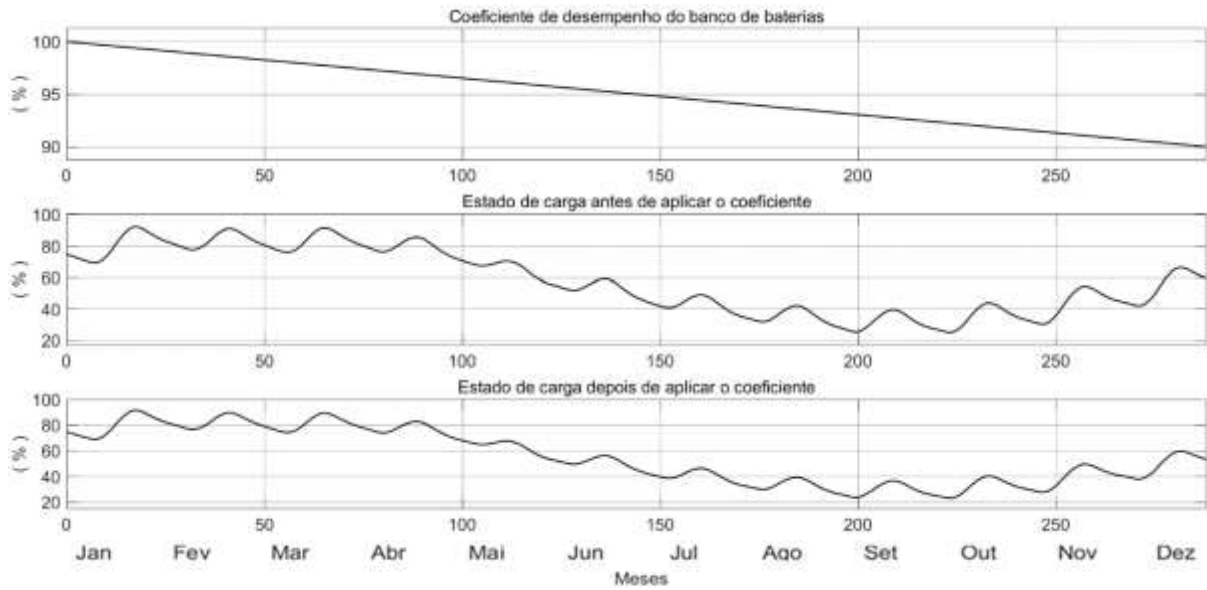
Figura 47 - Potência total gerada FV+EOL+BAT no cenário 2



Fonte: O autor.

De maneira semelhante a comparação realizada no cenário 1, neste cenário foi considerada, também, a queda de rendimento do banco de baterias. Uma vez que as fontes eólicas e fotovoltaicas têm período de pico de geração coincidindo durante o dia, o banco de baterias permanece com papel central para o fornecimento durante a noite, por exemplo. A Figura 48 apresenta este decaimento de rendimento e capacidade de armazenamento dos elementos do banco de baterias.

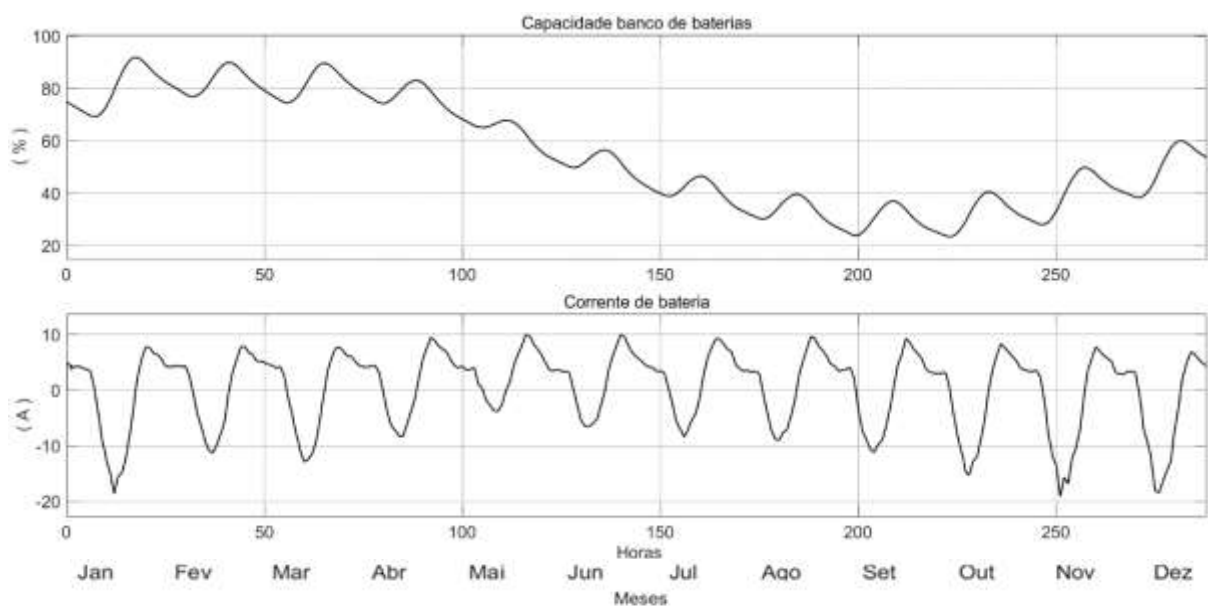
Figura 48 - Desempenho do banco de baterias no cenário 2



Fonte: O autor.

Na Figura 49 é mostrado o estado de carga das baterias, o que permite visualizar os períodos de carga e descarga e a amplitude de oscilação. O estado de carga no início e final do período simulado sugere que a inclusão da fonte eólica com consequente redução na quantidade de painéis fotovoltaicos é capaz de manter a capacidade de fornecimento de potência às cargas, além de diversificar a fonte de potência disponível para manutenção da capacidade de fornecimento das baterias.

Figura 49 - Estado de carga das baterias no cenário 2



Fonte: O autor.

## 4.2.4 Cenário 3: geração fotovoltaica em 1 ano

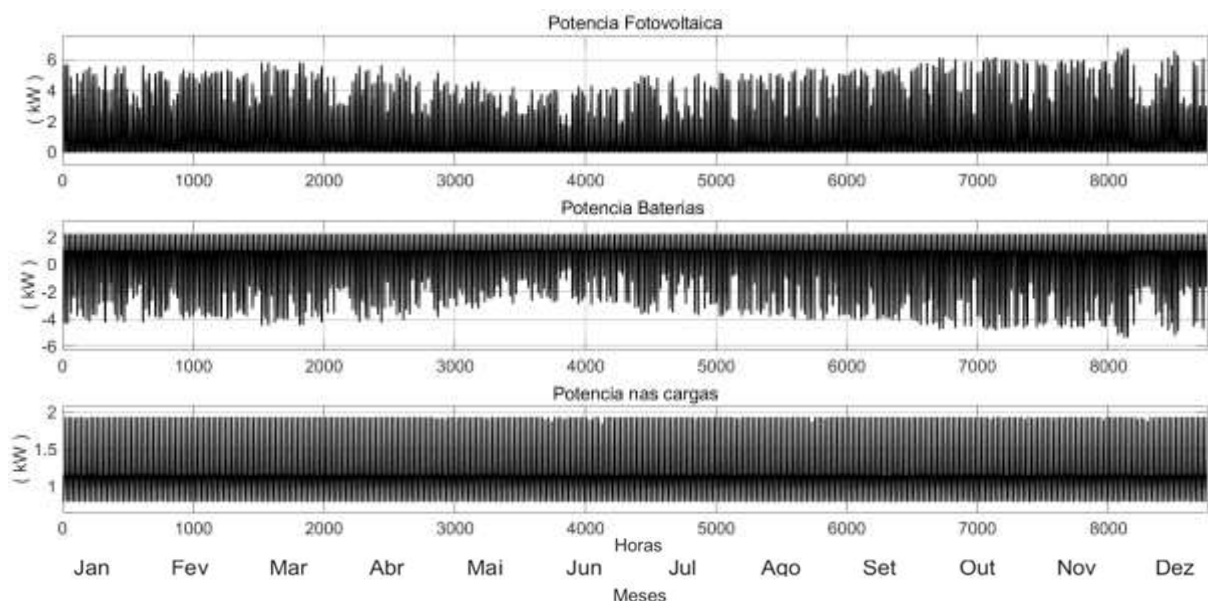
### 4.2.4.1 Descrição do cenário

Neste cenário é conduzida simulação os mesmos dados de entrada do cenário 1 foram utilizados: especificação dos painéis de geração fotovoltaica, consumo das cargas e capacidade nominal do banco de baterias. O período de simulação de 8760 horas correspondendo a um ano de operação contínua da micro rede.

### 4.2.4.2 Resultados e análises

A Figura 50 mostra a interação entre a potência gerada, armazenada e consumida pelas cargas no cenário 3. Neste cenário é foram utilizados 22 módulos de geração fotovoltaica com um banco de baterias com capacidade de 600 Ah, autonomia de operação de 1 dia.

Figura 50 - Potência total gerada FV+BAT no cenário 3



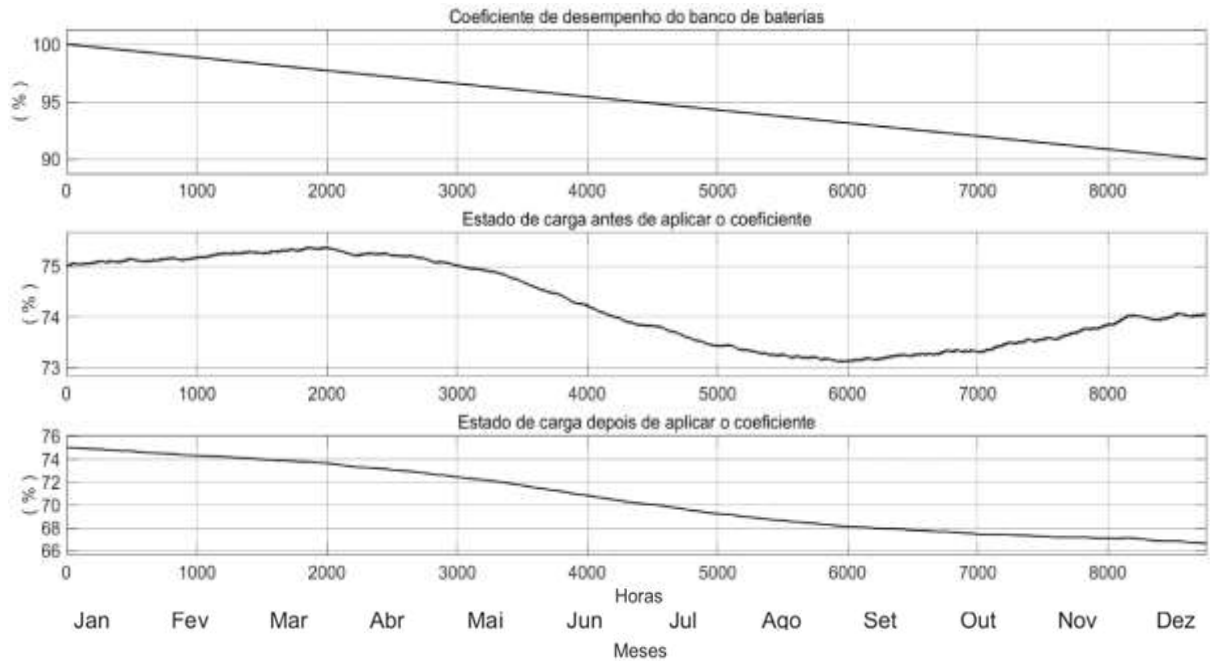
Fonte: O autor.

Ainda na Figura 50 é possível visualizar no segundo gráfico (potência das baterias) os picos negativos nos períodos de inverno são menores, o que revela que as baterias tem menor potência disponível para armazenamento no período de inverno.

A Figura 51 apresenta comparativo entre o resultado da simulação considerando a queda de desempenho das baterias. Esta queda no rendimento apresenta reflexos na

operação da micro rede, logo, deve ser considerada ao simular a operação em médio prazo. Tendo este decaimento no rendimento das baterias também leva a cálculos de dimensionamento assertivos, prevendo acréscimo de geração necessário a compensar a diminuição gradual na energia que será armazenada e disponibilizada no banco de baterias.

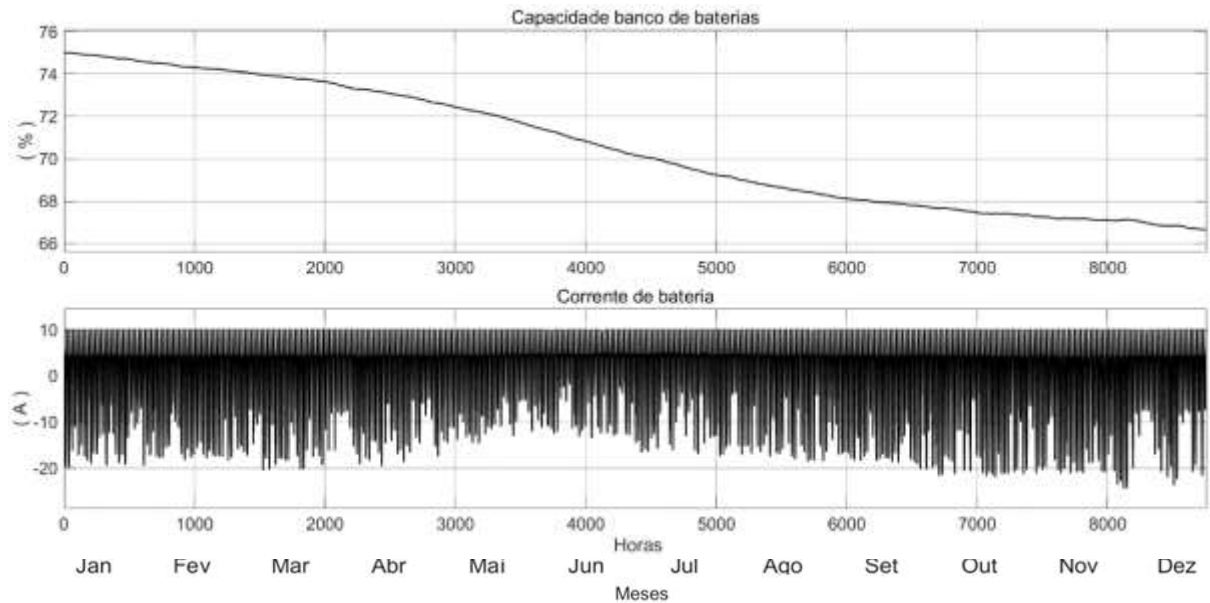
Figura 51 - Desempenho do banco de baterias no cenário 3



Fonte: O autor.

A Figura 52 mostra a variação do estado de carga do banco de baterias. Na simulação de 8760 h não foi identificada necessidade de acompanhar o comportamento oscilatório diário do estado de carga das baterias, uma vez que esta análise foi feita nos cenários 1 e 2. Na simulação de um ano (8760 h) o foco foi mantido no balanço de potência entre a geração, armazenamento e cargas em regime permanente de operação. A informação mais relevante é da tendência de queda ou aumento do estado de carga no decorrer dos meses.

Figura 52 - Estado de carga do banco de baterias no cenário 3



Fonte: O autor.

Durante o período de um ano o estado de carga apresentou significativa queda na capacidade de fornecimento de potência, logo o dimensionamento inicial do sistema de geração puramente fotovoltaico deve ser revisto para atender a demanda com segurança.

#### 4.2.5 Cenário 4: geração fotovoltaica e eólica em 1 ano

##### 4.2.5.1 Descrição do cenário

Nesta seção é apresentada uma simulação incluindo a fonte eólica e diminuindo a quantidade de painéis fotovoltaicos, porém mantendo o modelo utilizado nos cenários anteriores, considerando a mesma carga e mesmo sistema de armazenamento descrito no cenário 3. O período de simulação também foi de 8760 h (um ano de operação contínua da micro rede).

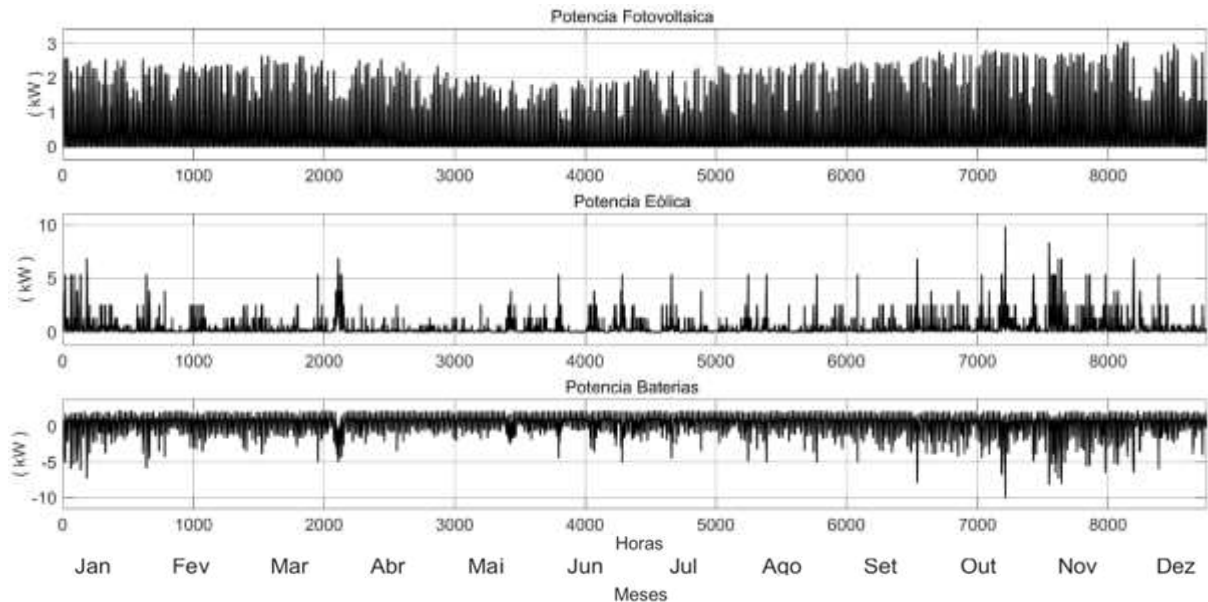
##### 4.2.5.2 Resultados e análises

Na Figura 53 é mostrado o resultado da simulação incluindo a fonte eólica na geração. Neste cenário foram utilizados 10 painéis de geração fotovoltaica de 315 Wp e 3 aerogeradores com potência nominal de geração de 1 kW. Observando o gráfico da



potência eólica fica evidente que durante os meses de inverno não houve queda acentuada na geração, como ocorre com o sistema fotovoltaico.

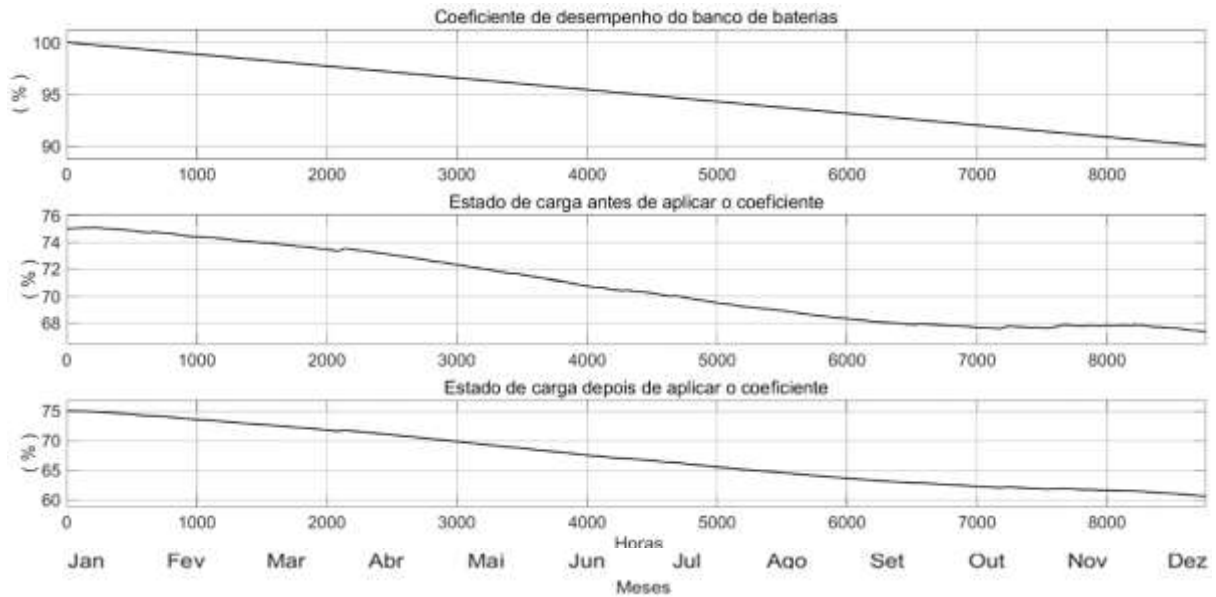
Figura 53 - Potência total gerada FV+EOL+BAT no cenário 4



Fonte: O autor.

A Figura 54 apresenta o a influência da aplicação do fator de queda de rendimento do banco de baterias após um ano de operação. Importante observar que o fator de queda de rendimento das baterias é uma variável fundamental para garantir um correto dimensionamento do sistema de armazenamento. Analisando o estado de carga do banco de baterias no último trimestre de simulação, tem-se que a capacidade armazenada apresentou uma tendência de aumento, porém quando é considerada a queda de rendimento, o estado de carga apresenta queda constante, confirmando o comportamento esperado ao considerar a queda da performance das baterias.

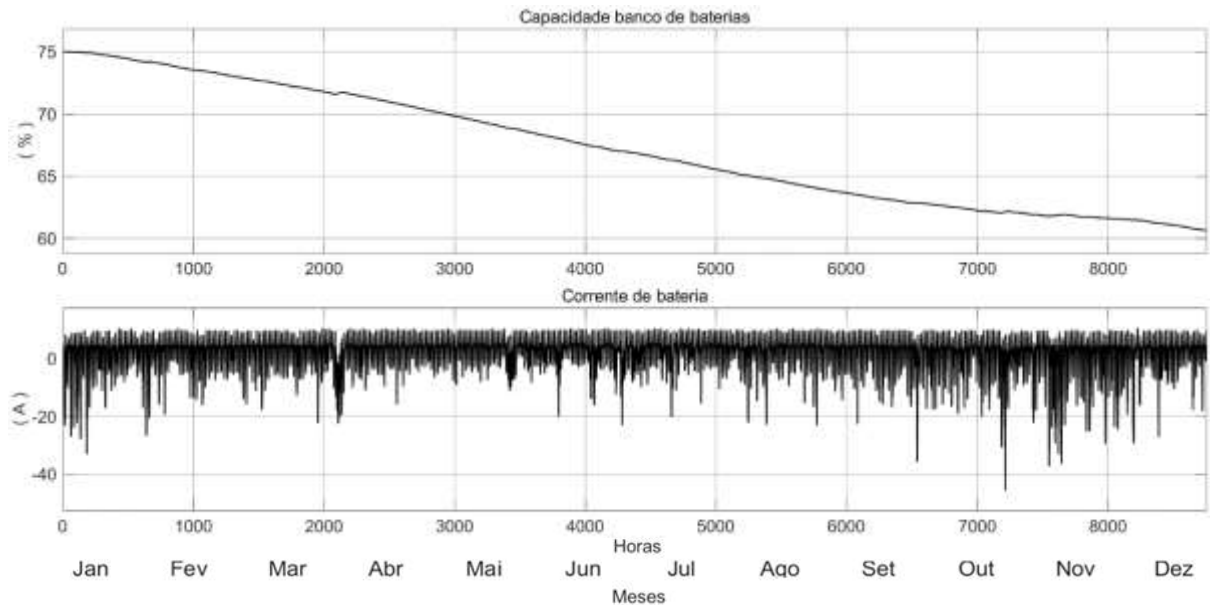
Figura 54 - Desempenho do banco de baterias no cenário 4



Fonte: O autor.

A Figura 55 apresenta a evolução do estado de carga das baterias ao longo do ano, e a corrente fornecida e consumida pelo banco de baterias.

Figura 55 - Estado de carga das baterias no cenário 4



Fonte: O autor.

A incluir a geração eólica, foi possível diminuir a quantidade de painéis de geração fotovoltaica, porém ao analisar o estado de carga final do banco de baterias, fica evidente que é necessário ajustar a capacidade de geração da micro rede para atingir uma condição em que a energia total consumida durante o ano seja compatível com a energia

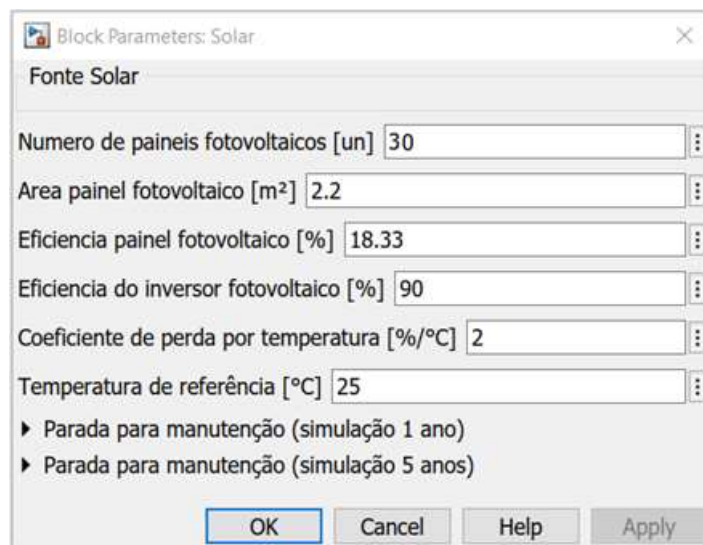
gerada. Este balanço entre a geração e o consumo é verificável ao analisar o estado de carga do banco de baterias, O cenário ideal seria aquele em que o valor de estado de carga no final da simulação estivesse próximo àquele configurado no início da simulação.

#### 4.2.6 Cenário 5: geração fotovoltaica revisada em 1 ano

##### 4.2.6.1 Descrição do cenário

Nesta seção é apresentada uma simulação na qual a capacidade total de geração é incrementada, uma vez que a análise do cenário 4 sugere que é necessário aumentar a geração total para manter um balanço energético satisfatório. Neste cenário foi revisada a potência nominal do sistema de geração fotovoltaica: foram alterados os painéis fotovoltaicos para um modelo superior: na Figura 56 estão os dados do modelo 405 halfcell do fabricante Canadian Solar. O período de simulação foi mantido em 8760 h.

Figura 56 - Geração fotovoltaica do cenário 5



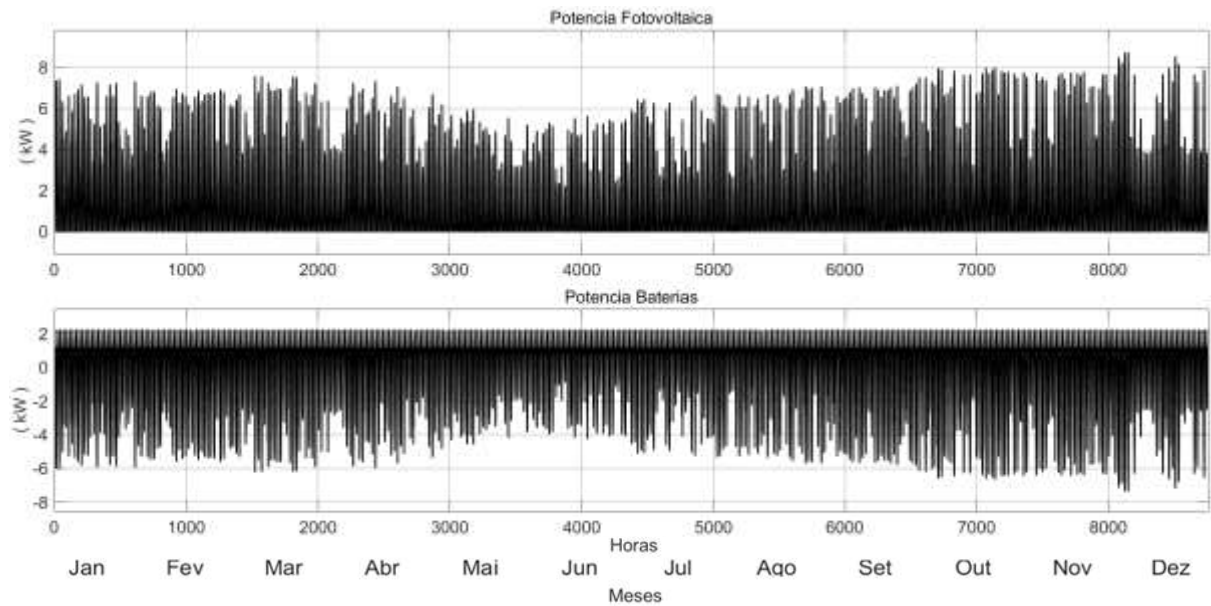
Parâmetro	Valor
Numero de paineis fotovoltaicos [un]	30
Area painel fotovoltaico [m <sup>2</sup> ]	2.2
Eficiência painel fotovoltaico [%]	18.33
Eficiência do inversor fotovoltaico [%]	90
Coeficiente de perda por temperatura [%/°C]	2
Temperatura de referência [°C]	25

Fonte: O autor.

##### 4.2.6.2 Resultados e análises

Na Figura 57 é mostrado o resultado da simulação após aumentar a potência total instalada da geração fotovoltaica.

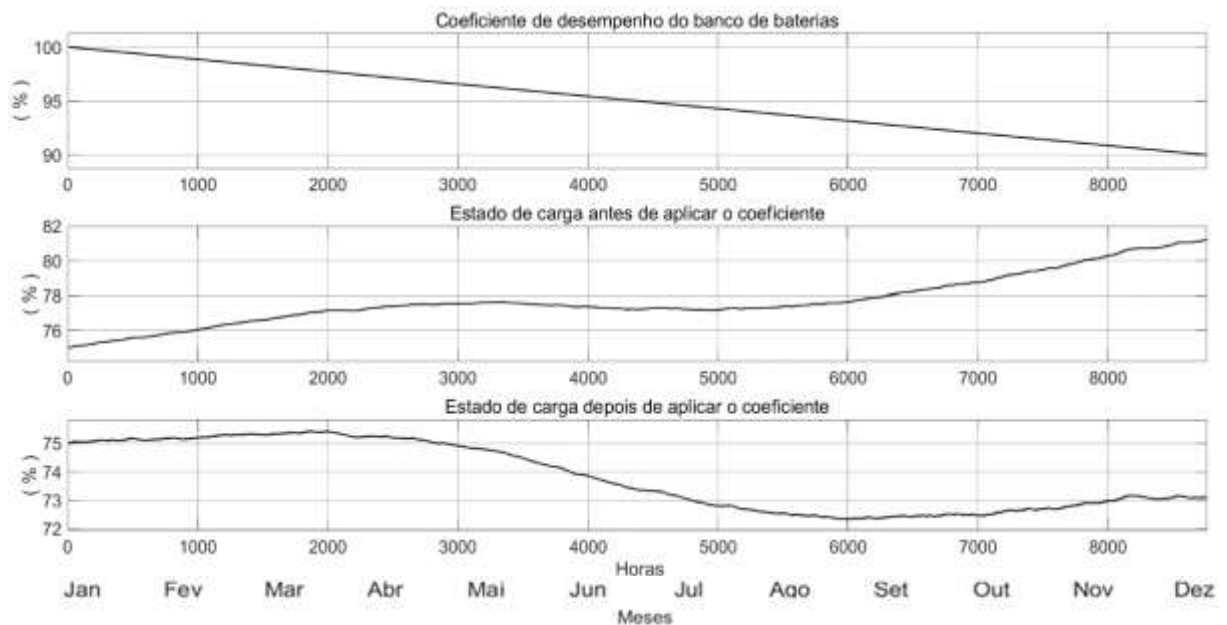
Figura 57 - Potência total gerada FV+BAT no cenário 5



Fonte: O autor.

A Figura 58 apresenta o estado de carga do banco de baterias neste novo cenário, no último trimestre de simulação, tem-se que a capacidade armazenada apresentou um aumento acentuado no último trimestre do ano, porém ao aplicar a queda de rendimento das baterias, o estado de carga real apresenta queda no período de inverno com recuperação gradual a partir do último trimestre.

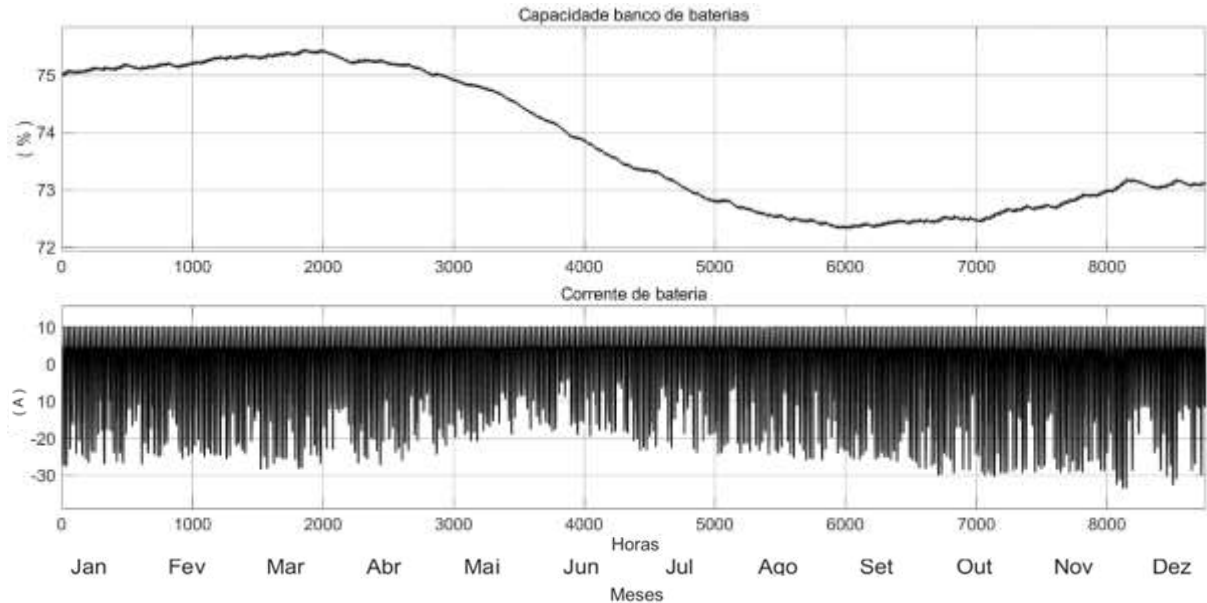
Figura 58 - Desempenho do banco de baterias no cenário 5



Fonte: O autor.

A Figura 59 Apresenta a evolução do estado de carga e a variação da corrente de carga e descarga das baterias.

Figura 59 - Estado de carga das baterias no cenário 5



Fonte: O autor.

Com a revisão da potência total instalada do sistema de geração fotovoltaica no cenário 5, o estado de carga do banco de baterias apresentou pequena recuperação no período do último trimestre. As melhorias implementadas com a troca de modelo de painéis fotovoltaicos e aumento da capacidade total de geração apresentaram melhoria em relação aos cenários 3 e 4.

#### 4.2.7 Cenário 6: geração fotovoltaica e eólica revisadas em 1 ano

##### 4.2.7.1 Descrição do cenário

Nesta seção é apresentada uma simulação na qual a capacidade total de geração é incrementada, uma vez que a análise do cenário 4 sugere que é necessário aumentar a geração total para manter um balanço energético satisfatório. Neste cenário foi revisada a potência nominal dos aerogeradores (Figura 60). Também foram alterados os painéis fotovoltaicos para um modelo superior: na Figura 61 estão os dados do modelo 405 halfcell do fabricante Canadian Solar. O período de simulação foi mantido em 8760 h.

Figura 60 - Geração eólica do cenário 6

Block Parameters: Eolico

Subsystem (mask)

Potencia Nominal do Gerador Eólico [KW]  
6

Eficiência do inversor Geração eólica [%]  
100

Altura de medição da velocidade do vento [m]  
10

Altura de instalação do aerogerador [m]  
20

- ▶ Seleção de gerador eólico
- ▶ Parada para manutenção (simulação 1 ano)
- ▶ Parada para manutenção (simulação 5 anos)

OK Cancel Help Apply

Fonte: O autor.

Figura 61 - Geração fotovoltaica do cenário 6

Block Parameters: Solar

Fonte Solar

Numero de paineis fotovoltaicos [un] 15

Area painel fotovoltaico [m<sup>2</sup>] 2.2

Eficiencia painel fotovoltaico [%] 18.33

Eficiencia do inversor fotovoltaico [%] 90

Coeficiente de perda por temperatura [%/°C] 2

Temperatura de referênciã [°C] 25

- ▶ Parada para manutenção (simulação 1 ano)
- ▶ Parada para manutenção (simulação 5 anos)

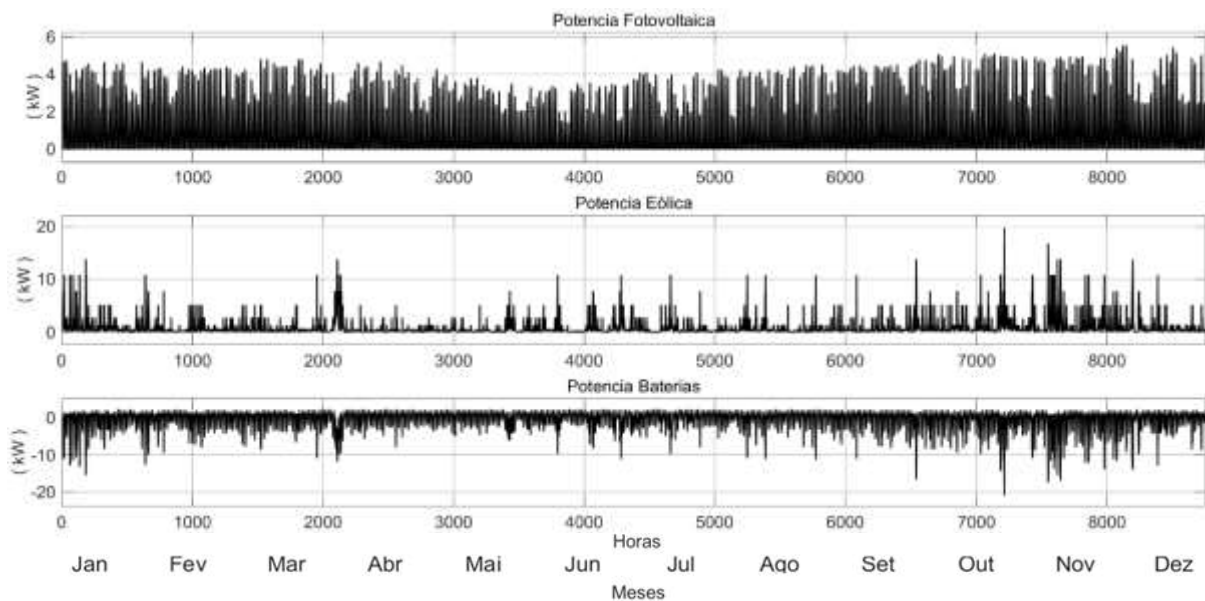
OK Cancel Help Apply

Fonte: O autor.

#### 4.2.7.2 Resultados e análises

Na Figura 62 é mostrado o resultado da simulação após aumentar a potência total instalada da micro rede. De maneira semelhante ao cenário 3, visualmente é possível verificar que os picos negativos no gráfico da potência das baterias não apresentam queda significativa, uma vez que a fonte eólica não apresentou queda significativa durante os meses de inverno.

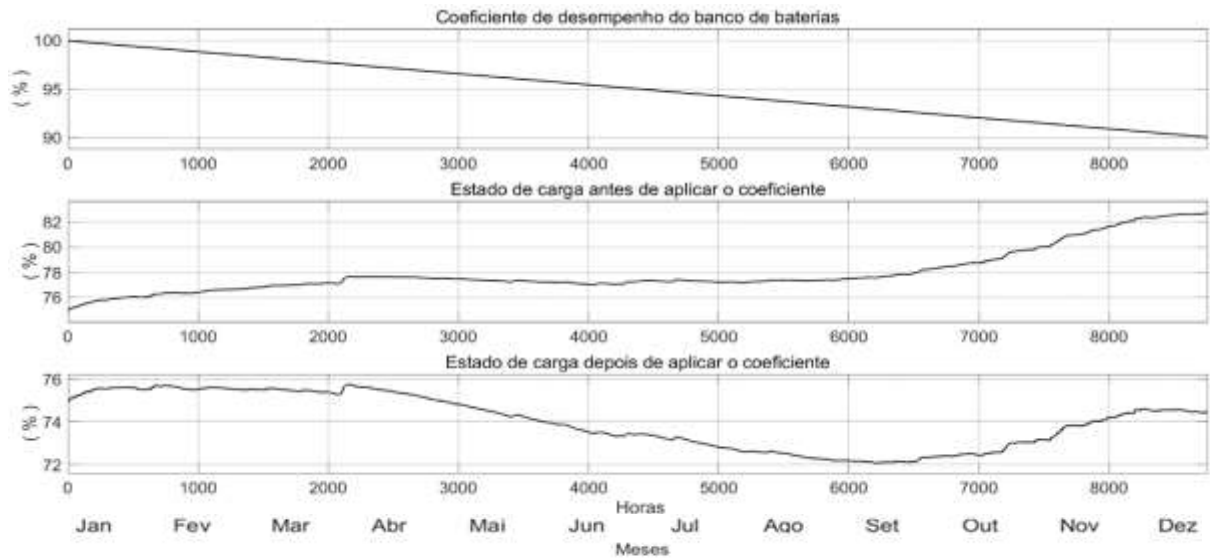
Figura 62 - Potência total gerada FV+EOL+BAT no cenário 6



Fonte: O autor.

A Figura 63 apresenta o estado de carga do banco de baterias neste novo cenário considerando a queda de performance das baterias. No último trimestre de simulação, tem-se que a capacidade armazenada apresentou uma tendência de aumento significativa na segunda metade do ano, porém ao aplicar a queda de rendimento das baterias, o estado de carga apresenta queda no período de inverno com recuperação gradual a partir do último trimestre.

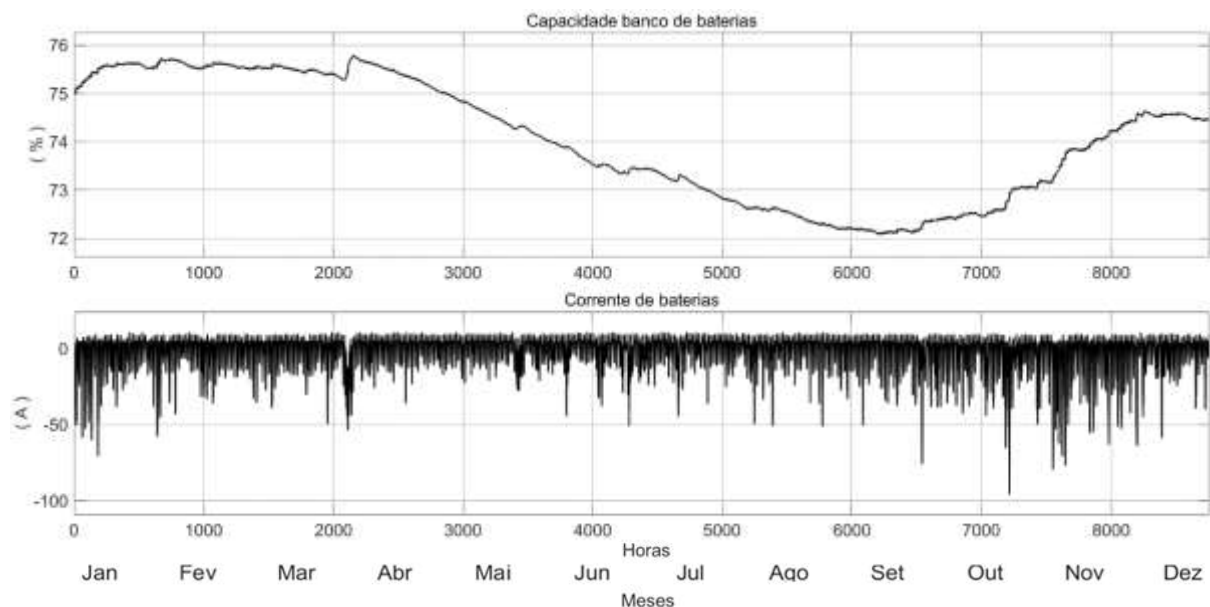
Figura 63 - Desempenho do banco de baterias no cenário 6



Fonte: O autor.

A Figura 64 Apresenta a evolução do estado de carga e a variação da corrente de carga e descarga das baterias. A corrente das baterias apresenta maior ocorrência de picos negativos, logo a nova capacidade de geração foi capaz de restabelecer o estado de carga das baterias após um período de queda na geração.

Figura 64 - Estado de carga das baterias no cenário 6



Fonte: O autor.

Com a revisão da potência total instalada apresentada no cenário 6 e com a inclusão da geração eólica, foi possível compatibilizar a geração com o consumo, uma vez que a energia armazenada no banco de baterias ao final da simulação é ligeiramente maior daquela existente no início do período.



### 4.3 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados das simulações com a ferramenta desenvolvida em ambiente *Simulink/MATLAB*, foram realizadas análises dos gráficos e valores numéricos tabelados.

Inicialmente foi apresentada uma instalação real de um sistema geração fotovoltaica localizada no município de Curitiba-PR. O sistema de geração foi reproduzido na ferramenta e foi conduzida uma simulação de geração anual. Os dados obtidos a partir do *Simulink* foram comparados com os dados reais do sistema de geração. A diferença entre a energia real gerada e a obtida na simulação foi de aproximadamente 270 kWh no período de um ano, representando 3,7 % da energia total gerada no período.

Considerando que a ferramenta de simulação desenvolvida é capaz de fornecer dados de simulação com bom grau de assertividade, foram estipulados cenários de geração e operação, considerando os dados ambientais disponíveis na localidade definida para estudo, no município de Jandaíra.

O primeiro período de simulação considerou um dia típico de cada mês do ano, com os dados ambientais coletados de hora em hora. Dentro desse período foram estipulados cenários com diferentes combinações da fonte solar, eólica e sistema de armazenamento.

Este cenário possibilita uma observação superficial da interação das fontes de geração, o sistema de armazenamento e as cargas, uma vez que considera valores médios mensais e permite observar se os parâmetros iniciais de dimensionamento dos equipamentos de geração e armazenamento estão adequados, oferecendo uma possibilidade de teste rápido dos parâmetros iniciais. O aspecto dinâmico do estado de carga no decorrer dos dias é observável nos cenários 1 e 2. A amplitude observada na dos gráficos de potência das baterias demonstra que a profundidade de descarga não foi maior que 30 %.

Os resultados da simulação em 288 horas sugerem que a parametrização do sistema de geração tem potencial de atender a demanda das cargas. No cenário 1 o estado de carga das baterias iniciou com 75 % e terminou a simulação com 60 % e no cenário 2 a capacidade inicial e final foram de 75 % e 45 % respectivamente, pode-se inferir que o sistema de geração e armazenamento dimensionado tem potencial de fornecer energia com garantia da continuidade do suprimento às cargas.

No cenário 3 estado de carga das baterias teve queda evidente nos primeiros três trimestres com pequeno aumento no último trimestre. Ao combinar a geração fotovoltaica com a eólica no cenário 4 mantendo a potência total instalada, foi observada uma tendência de queda menos acentuada em comparação com a queda observada no cenário 3. As simulações nos cenários 3 e 4 mostraram que o estado de carga das baterias esteve em constante queda, logo é necessário aumentar a potência total gerada para garantir que a geração de energia seja compatível com o consumo.

No cenário 5 foi realizada uma revisão da potência total de geração fotovoltaica instalada. Foi alterado o modelo de painel solar utilizado. Esta nova configuração do sistema de geração foi capaz de atenuar a queda do estado de carga no último trimestre, porém a energia total acumulada não pôde ser restabelecida ao valor inicial da simulação.

No cenário 6 foi incluída a geração eólica e ajustada a quantidade de painéis de geração fotovoltaica. Durante a simulação foi observado o mesmo comportamento de queda no estado de carga, mais acentuado nos meses de inverno. Porém no último trimestre ocorreu recuperação gradativa da energia armazenada nas baterias, demonstrando que o sistema de geração proposto neste cenário é compatível com o consumo das cargas.

A possibilidade de considerar a queda de rendimento das baterias contribui para a assertividade do dimensionamento do banco de baterias e sua capacidade de manter a confiabilidade e continuidade do fornecimento. A Tabela 11 apresenta a composição do sistema de geração dos cenários simulados.

Tabela 11 - Comparativo entre os cenários de geração

Cenário	Fontes	$N_{fv}$	$PTot_{fv}$	$Q_{bat}$	$PTot_{eol}$	$PTot_{fv+eol}$
1 e 3	FV+BAT	22	6,91	600	0	6,91
2 e 4	FV+EOL+BAT	10	3,14	600	3	6,14
5	FV+BAT	30	12,15	600	0	12,15
6	FV+EOL+BAT	15	6,075	600	6	12,075

Fonte: O autor

Na qual:

$N_{fv}$ : Quantidade de painéis fotovoltaicos instalados (un)

$PTot_{fv}$ : Potência total de pico fornecida pela geração fotovoltaica (kWp)

$PTot_{eol}$ : Potência total de pico fornecida pelos aerogeradores (kW)

$Q_{bat}$ : Capacidade de armazenamento total do banco de baterias (Ah)

$PTot_{fv+eol}$ : Potência total de pico fornecida pela geração fotovoltaica e eólica (kWp)

Uma vez que o período de simulação dos cenários 1 e 2 é reduzido, ocorreu diferença considerável no estado de carga observado nestes cenários, em comparação com os cenários 3 e 4. A simulação em um ano é mais realista e capaz de evidenciar o déficit entre a geração e o consumo, visível no estado de carga final das baterias.

As modificações realizadas no cenário 5 evidenciaram a necessidade de aumentar a capacidade de geração da micro rede. O cenário 5 simulou uma micro rede com sistema de geração puramente fotovoltaica, no cenário 6 foi investigada a utilização de geração híbrida: foi possível observar que o sistema de geração eólica foi decisivo para recuperar o estado de carga das baterias.

No último trimestre de simulação ocorreram picos de potência na geração eólica, causando picos de corrente de carga nas baterias e aumentando a energia total armazenada. Logo a inclusão da fonte eólica acrescenta segurança na manutenção do estado de carga das baterias. Observando o estado de carga inicial e final do banco de baterias na simulação de 8760 horas (cenário 6), conclui-se que a micro rede com geração híbrida é a solução mais vantajosa entre os cenários simulados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente dissertação são apresentados os resultados e análises de investigação da aplicação de micro redes de geração e distribuição para a atendimento a comunidades isoladas sem acesso ao sistema de fornecimento convencional.

Além da revisão de textos técnicos com o estado da arte em micro redes com geração híbrida, foram desenvolvidos modelos e ferramenta computacional no *Simulink/MATLAB*, para emprego em dimensionamento e análise de micro redes com fontes de energias renováveis dos tipos eólica e fotovoltaica.

As simulações conduzidas demonstraram que a interação entre o acúmulo da potência excedente existente na micro rede e o fornecimento de potência as cargas quando não existe geração principal ou ainda quando a geração é menor que a demanda, exige a utilização de um sistema de armazenamento. Esta foi a principal dificuldade encontrada durante o desenvolvimento desta ferramenta. Fato este que evidenciou o papel principal do sistema de armazenamento na garantia de fornecimento de energia às cargas na micro rede.

A facilidade de parametrização dos diferentes cenários de simulação aliada a possibilidade de analisar o comportamento da micro rede em diferentes períodos reforça a capacidade da ferramenta de simulação desenvolvida auxiliar no dimensionamento de maneira eficaz e versátil, porém são necessárias algumas adaptações às condições ambientais do local de instalação da micro rede estudada.

O levantamento dos recursos energéticos disponíveis é essencial para conferir assertividade aos resultados da simulação. Os dados ambientais utilizados no estudo são provenientes de base de dados criada a partir de modelos computacionais, porém deve ser considerada a coleta local dos dados de irradiação solar e velocidade de vento, através de equipamentos específicos para este fim, que fazem medições e armazenam os dados dos recursos disponíveis com precisão, necessário ainda considerar a influência da rugosidade do solo local, cobertura vegetal e outros fatores que possam alterar a incidência do vento nas pás dos aerogeradores.

O modelo desenvolvido no *Simulink* foi validado através de comparação realizada entre os resultados de uma simulação e os dados reais de um sistema de geração fotovoltaica instalada em Curitiba-PR, na qual o modelo desenvolvido foi capaz de estimar a geração de energia com uma pequena margem de erro.

As simulações descritas pelos cenários 1 e 2 fornecem uma análise rápida e objetiva do dimensionamento inicial dos equipamentos de geração e armazenamento. A aplicação dos cenários 3 e 4 levaram micro rede configurada nos cenários iniciais a um período de operação anual. Analisando as quatro simulações iniciais, foram criados novos cenários aumentando a capacidade de geração. O cenário 6 apresentou uma configuração de micro rede cuja potência instalada é compatível com a demanda das cargas.

A topologia de rede mais promissora é composta por sistema híbrido de geração, integrando geração fotovoltaica e eólica, a utilização de aerogeradores pode aumentar os custos iniciais de instalação, porém diversificar as fontes de energia aumenta a segurança energética do sistema. Na localidade de Jandaíra, o período do dia com maior incidência de ventos coincide com as horas de irradiação solar, exigindo um banco de baterias capaz de garantir todo o fornecimento de energia durante a noite. Porém em localidades nas quais houver complementariedade das fontes solar e eólica, seria possível utilizar um sistema de armazenamento com menor capacidade.

Especial atenção deve ser dada ao sistema de armazenamento, observando o estado de carga antes e depois da aplicação do fator de queda de rendimento das baterias fica evidente a necessidade de considerar este fator na etapa de dimensionamento, pois o desgaste natural dos elementos do banco de baterias não pode ser negligenciado na fase de projeto. O dimensionamento inicial do banco de baterias deve considerar, além da autonomia de fornecimento, a queda de performance inerente ao tempo de vida útil das baterias.

Na ferramenta de simulação desenvolvida é possível: variar a potência total disponibilizada pelas fontes de geração, considerar curvas características de diferentes equipamentos e sua eficiência, alterar a maneira que o consumo das cargas varia ao longo do dia, observar o comportamento da energia acumulada no banco de baterias considerando sua capacidade nominal e seu coeficiente de queda de performance no decorrer de seu período de vida útil.

As simulações conduzidas no ambiente *Simulink* viabilizam a análise e o dimensionamento de micro redes que utilizam recursos energéticos disponíveis localmente. O modelo de simulação foi concebido com o objetivo de estudar a aplicação da topologia de rede proposta, através de ambiente de simulação com configuração simplificada, com possibilidade de ser replicável para diferentes localidades.

A utilização de fontes renováveis integradas em uma micro rede isolada de geração e consumo proporciona independência energética às comunidades isoladas ao mesmo tempo em que reforça o compromisso com o desenvolvimento sustentável. Os conceitos acerca das micro redes discutidos nesta dissertação associados a utilização da ferramenta de simulação desenvolvida apresentam solução viável para fornecer energia elétrica a comunidades isoladas.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como principal fruto da dissertação, a ferramenta de simulação tem maior potencial e maior necessidade de aprimoramento e estudos futuros.

Futuramente seria interessante realizar estudos comparativos entre o funcionamento de sistemas de armazenamento reais e os simulados no Simulink/MATLAB, com o objetivo de aprimoramento da ferramenta de simulação. Tal comparação necessita de levantamento de dados em campo de sistemas em operação.

Existe a possibilidade de adaptar o ambiente de simulação para estimar o tempo de vida útil das baterias e corrigir o fator de queda de desempenho automaticamente, uma vez que este tempo de vida está associado também a quantidade de ciclos de carga e descarga e profundidade de descarga.

O aprimoramento da ferramenta de simulação demanda conhecimentos sólidos em sistemas de armazenamento e banco de baterias, além de melhor conhecimento nas funcionalidades e capacidade do *Simulink/MATLAB*, portanto é recomendável que em trabalhos futuros o modelo do sistema de armazenamento seja implementado de forma mais realista.

Ainda no sentido de aproximar o funcionamento da simulação às condições reais de operação, pode ser sugerida a inclusão de modelo de conversores eletrônicos de potência, visando permitir análise dos índices de qualidade de energia elétrica entregue aos consumidores da micro rede.

## REFERÊNCIAS

ABB. **ABB Inversores Solar**. 2019. Disponível em: [https://library.e.abb.com/public/80fcc007c062421a84fc0891e1b4df83/PVI-5000\\_6000-TL-OUTD-Product%20manual%20EN-RevC\(M000022CG\).pdf](https://library.e.abb.com/public/80fcc007c062421a84fc0891e1b4df83/PVI-5000_6000-TL-OUTD-Product%20manual%20EN-RevC(M000022CG).pdf) acesso em 05/08/18. Acesso em: 07 abr. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 493, de 05 de junho de 2012. Fonte de Energia Intermitente**. Brasília, DF, Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>. Acesso em: 04 out. 2020.

ALBRIGHT, G; EDIE, J; AL-HALLAJ, S. **A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications**. 2012. Disponível em: <http://www.batterypoweronline.com/wp-content/uploads/2012/07/Lead-acid-white-paper.pdf>. Acesso em: 15 maio 2018.

ALEX, Z. et al. Minimizing the Lead-Acid Battery Bank Capacity through a Solar PV - Wind Turbine Hybrid System for a high-altitude village in the Nepal Himalayas. **Energy Procedia**, San Diego, v. 57, p.1516-1525, 2014. Elsevier BV. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/276173089\\_Minimizing\\_the\\_LeadAcid\\_Battery\\_Bank\\_Capacity\\_through\\_a\\_Solar\\_PV\\_\\_Wind\\_Turbine\\_Hybrid\\_System\\_for\\_a\\_highaltitude\\_village\\_in\\_the\\_Nepal\\_Himalayas](https://www.researchgate.net/publication/276173089_Minimizing_the_LeadAcid_Battery_Bank_Capacity_through_a_Solar_PV__Wind_Turbine_Hybrid_System_for_a_highaltitude_village_in_the_Nepal_Himalayas)>. Acesso em: 01 nov. 2018.

AL-SHARAFI, Abdullah; YILBAS, Bekir S.; SAHIN, Ahmet Z.; AYAR, T.. Performance assessment of hybrid power generation systems: economic and environmental impacts. Economic and environmental impacts. **Energy Conversion And Management**, v. 132, p. 418-431, jan. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.047>. Acesso em 29 maio 2018.

ALZHRANI, A. et al. Modeling and Simulation of Microgrid. **Procedia Computer Science**, Chicago. v. 114, p.392-400, 2017. Elsevier BV. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.053>. Acesso em: 03 maio 2018.

ANEEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2020.

ANEEL. **Nota Técnica nº 78/2013 - Estrutura Tarifária: terceiro ciclo de revisões tarifárias das concessionárias de distribuição de energia elétrica**. Brasília: Aneel, 2013. 25 p. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2013/023/documento/nt\\_estrutura\\_tarifaria\\_modelo\\_v6\\_rge-versao\\_ap.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2013/023/documento/nt_estrutura_tarifaria_modelo_v6_rge-versao_ap.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2018.

ARAUJO, L. S. et Al.. Multi-converters droop control in single-phase microgrid. *In*: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS (PEDG), 8., 2007. Florianopolis. **Proceedings** [...] Florianopolis: IEEE, abr. 2017. p.17-24. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1109/pedg.2017.7972450>. Acesso em: 15 maio 2018.

ARULAMPALAM, A. et al. Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids. **International Journal of Electronics**, v. 91, n. 9, p.503-523, set. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00207210412331289023>. Acesso em: 02 abr. 2018.

BEHERA, S.; NANDKEOLYAR, S. Analysis of isolated hybrid system for power supply to a remote island. **Energy Procedia**, San Diego, v. 117, p.1040-1046, jun. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.226>>. Acesso em: 03 maio 2018.

BOUZID, A M. et al.. A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam v. 44, p.751-766, abr. 2015. Elsevier BV. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.016>. Acesso em 05 out. 2018.

CAMARGO, E.; RIBEIRO, F. S.; GUERRA, S. M. G. O programa Luz para todos: metas e resultados. *Espaço Energia*, Curitiba, n. 9, p.21-24, 2008. Disponível em: <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/9/EE009-04.pdf>. Acesso em: 03 maio 2018.

CEDAR LAKE VENTURES INC. **Condições meteorológicas médias do Aeroporto Dois de Julho**. 2020. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/147607/Clima-caracter%C3%ADstico-no-Aeroporto-Dois-de-Julho-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 04 out. 2020.

CENTER SOLAR. **Energia Solar**. 2018. Disponível em: <http://centersolar.com.br/produto/controlador-de-carga-60a-12-24v/>. Acesso em: 31 jul. 2018.

CRAWLEY, D.; LAWRIE L. **Repository of free climate data for building performance simulation**. 2019. Disponível em: [http://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_3\\_South\\_America/BRA\\_Brazil/index.html#IDBA\\_Bahia](http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html#IDBA_Bahia). Acesso em: 10 outubro 2019.

DAMIA SOLAR. **Aerogeradores**. 2020 Disponível em: [https://www.damiasolar.com/productos/iluminacion/aerogenerador-ecosolar-aero-1000-24v-potencia-max-3000w\\_da2020\\_110](https://www.damiasolar.com/productos/iluminacion/aerogenerador-ecosolar-aero-1000-24v-potencia-max-3000w_da2020_110). Acesso em: 06 out. 2020.

ENERGIA LIVRE (Paraná). **Produza sua própria energia**: inversor de frequência 2,2 kW. 2019. Disponível em: <https://www.lojaenergialivre.com.br/energia-solar-fotovoltaica/kits/kit-off-grid/inversor-de-frequencia-2-2kw-bombeamento-solar-ate-5cv>. Acesso em: 06 out. 2020.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2017**: relatório síntese. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatorio%20Sintese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em: 09 abril 2020.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2018**: relatório síntese. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relatorio%20Sintese%202018-ab%202017vff.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2019.



EPE. **Balço Energético Nacional 2019**: Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-21/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019\\_Final.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-21/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf). Acesso em: 04 out. 2020.

EPE. **METODOLOGIA: Projeção de curva de carga horária**: nota técnica nt/epe/dea-005/2020. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. 27 p. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-476/NT%20Metodologia%20Proje%C3%A7%C3%A3o%20Carga%20Hor%C3%A1ria\\_EPE-NT-EPE-DEA-005-2020.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-476/NT%20Metodologia%20Proje%C3%A7%C3%A3o%20Carga%20Hor%C3%A1ria_EPE-NT-EPE-DEA-005-2020.pdf). Acesso em: 05 out. 2020.

GAN, L. K.; SHEK, J. K.H.; MUELLER, M. A. Hybrid wind–photovoltaic–diesel–battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: a case study in Scotland. **Energy Conversion And Management**, Edinburgh, v. 106, p.479-494, dez. 2015. Elsevier BV. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.029>. Acesso em 21 maio 2018.

GODDARD SPACE FLIGHT CENTER (Estados Unidos da América). Nasa. **AERONET**: Data Sinergy Tool. 2017. Disponível em: [https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/synergism.html](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/synergism.html). Acesso em: 18 nov. 2020.

GUERRERO, J.M. et al.. Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, Sevilla: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 56, n. 3, p.726-736, mar. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/tie.2008.2009274>. Acesso em 21 maio 2018.

HASAN, M; CHOWDHURY, N; HOSSAIN, C. A.; LONGO, M.. State of Art on Possibility & Optimization of Solar PV-Wind Hybrid System. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS, ELECTRICAL AND SIGNA, 1., 2019. **Processing Techniques (Icrest)** [...] [S.l.]: IEEE, 2019. p. 598-601. <http://dx.doi.org/10.1109/icrest.2019.8644485>.

HERNANDEZ, F. I. et al.. Energy management and control for islanded microgrid using multi-agents. *In*: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM (NAPS), 2013. Nova Iorque. **Proceedings** [...] [S.l.]: IEEE, set. 2013. p.35-42. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1109/naps.2013.6666963>. Acesso em: 17 maio 2018.

IBGE. **Estimativas de população**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>. Acesso em: 09 abr. 2020.

IBGE. (Brasil). **Porcentagem da população com acesso à eletricidade**: Indicador 7.1.1. 2019. Disponível em: <https://indicadoresods.ibge.gov.br/objetivo7/indicador711# -->. Acesso em: 10 abr. 2019.

IBGE. (Brasil). **Cidade e Estados**: Jandaíra, código: 2917904. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba/jandaira.html>. Acesso em: 17. nov. 2020.

MITA, H. (United States). **Simplified Model of a Small Scale Micro-Grid**. 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html>. Acesso em: 01 mar. 2018.

HAYONIK LTDA. **Energia e Inversores**. 2018. Disponível em: <https://www.hayonik.com/categoria/energia-inversores>. Acesso em: 30 jul. 2018

IBGE. **Sinopse do censo demográfico 2010**. Brasília. 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=P13&uf=00>. Acesso em: 15 maio 2018.

IBGE. **Energia elétrica chega a 97,8% dos domicílios brasileiros, mostra censo demográfico. 2011**. Brasília. 2011. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/11/energia-eletrica-chega-a-97-8-dos-domicilios-brasileiros-mostra-censo-demografico>. Acesso em: 15 maio 2018.

JAYALAKSHMI, N. S.; GAONKAR, D. N.. Performance study of isolated hybrid power system with multiple generation and energy storage units. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY SYSTEMS, 2011. Pittsburgh. **Proceedings** [...] [S./]: IEEE, dez. 2011. p.1-5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/icpes.2011.6156623>. Acesso em 21 maio 2018.

KUMAR, A et al. Energy management system controller for a rural microgrid. **The Journal of Engineering**, Londres: Institution of Engineering and Technology (IET), n. 13, p.834-839, jan. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1049/joe.2017.0447>>. Acesso em: 21 maio 2018.

LI, C et al. Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China. *Energy*, Dublin, v. 55, p.263-272, jun. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.084>. Acesso em: 21 maio 2018.

LI, S. et al. Optimization for a Grid-connected Hybrid PV-wind-retired HEV Battery Microgrid System. **Energy Procedia**, San Diego, v. 105, p.1634-1643, maio 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.532>. Acesso em: 21 maio 2018.

MAHAPATRA, S.; DASAPPA, S.. Rural electrification: optimizing the choice between decentralized renewable energy sources and grid extension. **Energy For Sustainable Development**, Bangalore, v. 16, n. 2, p.146-154, jun. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.01.006>. Acesso em: 17 maio 2018.

MAY, G. J.; DAVIDSON, A.; MONAHOV, B. Lead batteries for utility energy storage: review. **Journal Of Energy Storage**, Londres, v. 15, p.145-157, fev. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>. Acesso em: 21 maio 2018.

METEO-FRANCE. (França). **SATMOS**: Service d'Archivage et de Traitement Météorologique des Observations Satellitaires, 2018. Disponível em: <https://satmos.aeris-data.fr/>. Acesso em: 18 nov. 2020.

MME. (Brasil). **Manual para atendimento às regiões remotas dos sistemas isolados**. 1. ed. Brasília, 2017. 13 p. Disponível em: [https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual\\_dos\\_Sistemas\\_Isolados\\_Revisão\\_1.pdf](https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual_dos_Sistemas_Isolados_Revisão_1.pdf). Acesso em: 15 maio 2018.

MOKHEIMER, E. M. A. et al. A New Study for Hybrid PV/Wind off-Grid Power Generation Systems with the Comparison of Results from Homer. **International Journal of Green Energy**, Londres, v. 12, n. 5, p.526-542, 8 dez. 2014. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2013.833929>. Acesso em: 15 maio 2018.

MORREN, J. **Grid support by power electronic converters of Distributed Generation units**. 2006. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2006. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:ef7c350e-9292-4064-b1c9-81ed15e7cfc1/datastream/OBJ/download>. Acesso em: 02 maio 2018.

NEO SOLAR. (São Paulo). **Baterias estacionárias**. 2019. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria.html>. Acesso em: 07 out. 2020

NOAA. (U.S.A.) **Comprehensive Large Array Data Stewardship System**. 2020. Disponível em: <https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome;jsessionid=C71BA2167A8E76D163BC46C7D6CDFC06>. Acesso em: 18 nov. 2020.

ONS. **Sistemas Isolados**. Brasil, 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados> Acesso em: 20 out. 2020.

PATEL, H.; SHAH, A. A novel control method for UPS battery charging using Active Front End (AFE) PWM rectifier. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, DRIVES AND ENERGY SYSTEMS (PEDES)*, [S.l.], p. 1-6, dez. 2016. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pedes.2016.7914232>.

PEREIRA, E. B. Instituto Nacional de Pesquisas Energéticas. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/atlas-brasileiro-de-energia-solar-2a-edicao.html>. Acesso em: 15 maio 2018.

PINHO, J. T. (ed.). **Soluções Energéticas para a Amazônia: sistemas híbridos**. Brasília: Cdd, 2008. 398 p. Disponível em: [https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes\\_Energeticas\\_para\\_a\\_Amazonia\\_Hibrido.pdf](https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf). Acesso em: 20 mar. 2018.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES). Rio de Janeiro: CEPEL - GTES, 2014

POULLIKKAS, A. Implementation of distributed generation technologies in isolated power systems. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Nicosia, Cyprus v. 11, n. 1, p.30-56, jan. 2007. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.01.006>. Acesso em: 17 maio 2018.

QIN, L.; YANG, W. Micro-Grid Converter Droop Control Strategy and Simulation. **Advances In Electrical And Computer Engineering**, Suceava, Beijing v. 13, n. 4, p.74-80, nov. 2013. Disponível em: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2015/Tenerife/COMEL/COMEL-09.pdf>. Acesso em: 03 maio 2018.

REHMAN, S; AL-HADHRAMI, L. M.. Study of a solar PV–diesel–battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha, Saudi Arábia. **Energy**, Dublin, v. 35, n. 12, p.4986-4995, dez. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.025>. Acesso em: 22 maio 2018.

REIS, P. **Portal Energia: energias renováveis**. 2020. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/>. Acesso em: 06 out. 2020.

RIBEIRO, L. A. S et al. Isolated Micro-Grids With Renewable Hybrid Generation: The Case of Lençóis Island. **IEEE Transactions On Sustainable Energy**, Charlotte: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 2, n. 1, p.1-11, jan. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/tste.2010.2073723>. Acesso em: 03 maio 2018.

RÍO, P.; BURGUILLO, M. An empirical analysis of the impact of renewable energy deployment on local sustainability. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Londres, v. 13, n. 6-7, p.1314-1325, ago. 2009. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.001>. Acesso em: 17 maio 2018.

SANTOS, T. B. dos. **Estudo e Implementação de sincronia de inversores trifásicos Gridtied**. 2016. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157864/001021090.pdf?sequence=1>. Acesso em: 31 mar. 2020

SATRIX. **Energias Renováveis**. 2011. Disponível em: <http://admsatrix10.wixsite.com/backup2-satrix/aerogeradores>. Acesso em: 05 ago. 2011.

SCHOFIELD, J. **Comparing the environmental impacts of diesel generated electricity with hybrid diesel-wind electricity for off grid first nation communities in ontario**: incorporating a life cycle approach. 2011. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Environmental Applied Science and Management, Ryerson University, Ontario, 2011. Disponível em: [http://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA:2104/datastream/OBJ/download/Comparing\\_The\\_Environmental\\_Impacts\\_Of\\_Diesel\\_Generated\\_Electricity\\_With\\_Hybrid\\_Diesel\\_wind\\_Electricity\\_For\\_Off\\_Grid\\_First\\_Nation\\_Communities\\_In\\_Ontario\\_\\_\\_Incorporating\\_A\\_Life\\_Cycle\\_Approach.pdf](http://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA:2104/datastream/OBJ/download/Comparing_The_Environmental_Impacts_Of_Diesel_Generated_Electricity_With_Hybrid_Diesel_wind_Electricity_For_Off_Grid_First_Nation_Communities_In_Ontario___Incorporating_A_Life_Cycle_Approach.pdf). Acesso em: 03 maio 2018.

SINHA, S.; CHANDEL, S. S.. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Londres, v. 32, p.192-205, abr. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>. Acesso em 22 maio 2018.

SIZEMORE, J.; MUELLER, J. **MATLAB Para Leigos**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016. 448 p. Tradução por DocWare Assessoria Editorial LTDA.

SMITH, C. et al. Comparative Life Cycle Assessment of a Thai Island's diesel/PV/wind hybrid microgrid. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 80, p.85-100, ago. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.003>. Acesso em: 05 maio 2018.

SOLARIS. **CS6P-265P 265W Poly Solar Panel**. 2020. Disponível em: <https://www.solaris-shop.com/canadian-solar-cs6p-265p-265w-poly-solar-panel/>. Acesso em: 11 abr. 2020

TELARETTI, E; DUSONCHET, L. Stationary battery systems in the main world markets: part 1. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING AND 2017 IEEE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS EUROPE (EEEIC / I&CPS EUROPE). 2017. **Proceedings** [...]. 2017., p. 1-5, jun. 2017. IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/eeeic.2017.7977799>. Acesso em: 05 maio 2018.

TRACEL (Duque de Caxias-Rj). **Inversor Solar Híbrido**. 2019. Disponível em: [https://www.tracel.com.br/inversor-solar-hibrido-tracel/?gclid=CjwKCAjwq\\_D7BRADEiwAVMDdHtuMdtVPkspin30EZCqS89ut9SGMK317dE4wEfjp6f3Ju8LE5wTo9RoC42MQAvD\\_BwE#](https://www.tracel.com.br/inversor-solar-hibrido-tracel/?gclid=CjwKCAjwq_D7BRADEiwAVMDdHtuMdtVPkspin30EZCqS89ut9SGMK317dE4wEfjp6f3Ju8LE5wTo9RoC42MQAvD_BwE#). Acesso em: 06 out. 2020.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Editora Érica, 2015.

VISION. **Plant Viewer: Solar Scheer**. 2019. Disponível em: <https://easyview.auroravision.net/easyview/?entityId=16079570>. Acesso em: 07 ago. 2019.

XIE, M. et Al.. Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multi-crystalline photovoltaic production based on life cycle assessment. **Journal Of Cleaner Production**, Londres, v. 184, p.648-659, maio 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.290>. Acesso em: 05 maio 2018.

YARAMASU, V; WU, B.; SEN, P. C.; KOURO, S.; NARIMANI, M. High-power wind energy conversion systems: state-of-the-art and emerging technologies. State-of-the-art and emerging technologies. **Proceedings Of The IEEE**, [s.l.], v. 103, n. 5, p. 740-788, maio 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2014.2378692>. Acesso em: 07 maio 2018.