

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Priscila Silveira Ebert

**MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADO A
INTEGRAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS
CONSIDERANDO A OPERAÇÃO EM UMA MICRORREDE**

Santa Maria, RS

2019

Priscila Silveira Ebert

**MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADO A
INTEGRAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS
CONSIDERANDO A OPERAÇÃO EM UMA MICRORREDE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do Título de **Doutora em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Sperandio

Santa Maria, RS

2019

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Ebert, Priscila Silveira
MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADO A INTEGRAÇÃO
DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS CONSIDERANDO A
OPERAÇÃO UMA MICRORREDE / Priscila Silveira Ebert.- 2019.
121 p.; 30 cm

Orientador: Mauricio Sperandio
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Integração de recursos energéticos 2. Gerenciamento
de demanda 3. Dinâmica de Sistemas I. Sperandio, Mauricio
II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, PRISCILA SILVEIRA EBERT, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Priscila Silveira Ebert

**MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADO A
INTEGRAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS
CONSIDERANDO A OPERAÇÃO EM UMA MICRORREDE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do Título de **Doutora em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 29 de agosto de 2019:

Mauricio Sperandio, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Nelson Knak Neto, Dr. (URI)

Everthon Taghori Sica, Dr. (IFSC)

Laura Lisiane Callai dos Santos, Dra. (UFSM)

Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais, Harry e Carla, exemplos de dignidade e caráter, pelo carinho, incentivo e orgulho demonstrados ao longo de toda minha vida.
- À minha irmã, Rayssa, pela amizade e por estar sempre presente.
- Ao meu namorado, Daniel, pelo apoio e parceria, essenciais ao final dessa jornada.
- Às minhas filhas felinas *Biguda* e *Chanel*, que fizeram com que a saudade e a distância da família fossem amenizadas, sempre demonstrando carinho e afeto.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Mauricio Sperandio, pela confiança, amizade, disponibilidade e pelos diversos conhecimentos transmitidos ao longo destes anos.
- Aos colegas, amigos e professores da Universidade Federal de Santa Maria pelo companheirismo e amizade.
- A todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

*Dedico esta Tese à minha família,
em especial aos meus amados
pais, Harry e Carla e à minha
irmã, Rayssa, pelo incentivo e
apoio em todas as minhas escolhas
e decisões.*

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem.
Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.” (Walter
S. Landor)

RESUMO

MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADO A INTEGRAÇÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS CONSIDERANDO A OPERAÇÃO EM UMA MICRORREDE

AUTORA: Priscila Ebert
ORIENTADOR: Mauricio Sperandio

O setor elétrico mundial vem passando por significativas mudanças ao longo dos anos, devido a busca por diversificação energética e avanço da tecnologia. Essas mudanças são impulsionadas pela demanda de substituição dos combustíveis fósseis por recursos renováveis e menos poluentes. Contudo, esse processo não é simples, considerando que diversas incertezas são envolvidas no planejamento, gerenciamento e operação desses recursos. Tendo em vista essa problemática, e, considerando que existem poucas metodologias de planejamento econômico que consigam incluir integração de recursos energéticos e gerenciamento de demanda em um mesmo modelo computacional, a presente pesquisa tem como finalidade desenvolver um modelo em Dinâmica de Sistemas, onde é possível obter a viabilidade econômica de um determinado projeto envolvendo fontes de geração e armazenamento de energia, formando uma microrrede, e obtendo assim, a resposta da demanda. A modelagem em Dinâmica de Sistemas apresenta vantagens em comparação às existentes, pois nela é possível acrescentar variáveis de um determinado problema e obter respostas com maior facilidade. Como foco do trabalho está a geração distribuída, incluindo fontes intermitentes, como fotovoltaica e eólica, e fontes com despacho controlado utilizando motores à combustão, combinada com armazenadores de energia e com a redução da demanda. Com o modelo é possível obter a geração de energia de cada fonte, a redução na curva de demanda, as faturas com e sem a inserção da microrrede, o fluxo de caixa e a possibilidade de expansão do sistema. Um estudo de caso é aplicado ao modelo desenvolvido, onde é feita uma análise econômica da instalação de uma microrrede integrando os recursos de geração existentes no local, a fim de reduzir a fatura de energia elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. Os resultados obtidos com a aplicação do estudo de caso comprovam a viabilidade de utilização do modelo para analisar os benefícios econômicos da implantação de recursos energéticos distribuídos.

Palavras chave: Integração de recursos. Gerenciamento de demanda. Dinâmica de Sistemas.

ABSTRACT

SYSTEM DYNAMICS MODEL APPLIED TO THE INTEGRATION OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES CONSIDERING THE OPERATION IN A MICROGRID

AUTHOR: Priscila Ebert
ADVISOR: Mauricio Sperandio

The global electricity sector has undergone significant changes over the years, due to the search for energy diversification and the advancement of technology. These changes are driven by the demand to replace fossil fuels with renewable and less polluting resources. However, this process is not simple, considering that several uncertainties are involved in the planning, management and operation of these resources. In view of this problem, and considering that there are no economic planning methodologies that can include integration of energy resources and demand management in the same computational model, this research aims to develop a model in Systems Dynamics, where it is possible to obtain the economic viability of a given project involving sources of generation and storage of energy, forming a micro-grid, and thus obtaining the reduction of demand. The modeling in System Dynamics presents advantages in comparison to the existing ones, because it is possible to add variables of a certain problem and obtain answers with greater ease. The focus of the work is distributed generation, including intermittent sources, such as photovoltaic and wind, and controlled dispatch of combustion engines sources, combined with energy storage and demand management. With the model it is possible to obtain the power generation from each source, the reduction in the demand curve, the invoices with and without the insertion of the micro-grid, the cash flow and the possibility of expanding the system. A case study is applied to the developed model, where an economic analysis of the installation of a microgrid is made integrating the existing generation resources at the site, in order to reduce the electric energy bill of the Federal University of Santa Maria. The results obtained with the application of the case study proved the feasibility of using the model to analyze the economic benefits of implementing distributed energy resources.

Keywords: Integration of resources. Demand management. System Dynamics.

LISTA DE VARIÁVEIS

| | | |
|-----------------------|------------------|---|
| AhFB | Ah | Ampére-hora fornecido pelas baterias |
| AhTN | Ah | Ampére-hora total necessário |
| Área do módulo | m ² | Área ocupada pelo módulo fotovoltaico |
| AT | Horas | Tempo de autonomia necessário |
| Biodiesel | Litros | Disponibilidade de biodiesel |
| C | Litros ou kg | Combustível |
| CB | Ah | Carga para as baterias |
| CBD | Litros | Consumo de biodiesel |
| CD | A | Corrente de descarga |
| CE | Litros | Consumo de etanol |
| CG | W | Consumo do gerador |
| CGB | Litros/(1/4)hora | Consumo do gerador a biodiesel |
| CGE | Litros/(1/4)hora | Consumo do gerador a etanol |
| CM | Litros | Consumo de metanol |
| CMP | Litros | Consumo de matéria-prima |
| CMS | Litros | Consumo de metilato de sódio |
| CnB | Ah | Capacidade nominal da bateria |
| CpD | Ah | Capacidade de descarga |
| DB | Ah | Descarga das baterias |
| DCFP | kW | Demanda contratada fora ponta |
| DCP | kW | Demanda contratada em ponta |
| DFSE | W | Demanda faturada com fotovoltaica e onca |
| DG | W | Despacho do gerador |
| DG | Adimensional | Despacho do gerador |
| DG2 | Adimensional | Despacho do segundo gerador |
| DS | W | Demanda a ser suprida |
| DUFFP | kW | Demanda de ultrapassagem faturada fora ponta |
| DUFP | kW | Demanda de ultrapassagem faturada em ponta |
| DUGDFP | kW | Demanda de ultrapassagem GD fora ponta |
| DUGDP | kW | Demanda de ultrapassagem GD em ponta |
| EMC | Ah | Estado mínimo de carga |
| Etanol | Litros | Disponibilidade de etanol |
| G | W/m ² | Irradiação incidente |
| G* | W/m ² | Irradiação de referência |
| GE | W | Geração com etanol |
| GG | Litros | Geração de glicerina |
| GSE | W | Geração fotovoltaica eólica |
| GSED | W | Geração fotovoltaica eólica disponível |
| Icc* | A | Corrente de curto circuito de referência |
| IE | Litros ou kg | Insumos energéticos |
| Imax | A | Corrente no ponto de máxima potência |
| Imax* | A | Corrente de referência no ponto de máxima potência |
| Io* | A | Corrente inversa máxima de saturação do díodo |
| K | | Constante de Boltzmann (k=1,38x10 ⁻²³ J/°K); |
| M | Adimensional | Fator de idealidade do díodo |

| | | |
|---------------------------------|----------------|---|
| m' | Adimensional | Fator de idealidade equivalente |
| MDFFP | kW | Máxima demanda faturada fora ponta |
| MDFP | kW | Máxima demanda faturada em ponta |
| MDGDFP | kW | Máxima demanda mensal com GD fora ponta |
| MDGDP | kW | Máxima demanda mensal com GD em ponta |
| MPC | Litros ou kg | Matéria-prima consumida |
| MPD | Litros ou kg | Matéria-prima disponível |
| MPI | Litros ou kg | Matéria-prima inicial |
| MPI | Litros | Matéria-prima inicial |
| MR | Litros | Quantidade de metanol recuperado |
| MS | Litros | Metilato de sódio armazenado |
| MT | Litros | Metanol armazenado |
| NB | Baterias | Número de baterias |
| NP | Baterias | Número de baterias em paralelo |
| NS | Baterias | Número de baterias em série |
| Nsm | Células | Número de células ligadas em série |
| PA | W | Potência de armazenagem |
| PEB | W | Potência entregue pelas baterias |
| PG | W | Potência do gerador |
| PGB | W | Potência do gerador a biodiesel |
| PGE | W | Potência do gerador a etanol |
| Pmax | W | Potência máxima |
| q | | Carga elétrica do elétron ($q=1,6 \times 10^{-19}$) |
| QBR | Litros | Quantidade de bebida recebida na mic |
| QLC | m ³ | Quantidade de lenha consumida |
| RMP | Litros | Rendimento da matéria-prima |
| SCFFP | kWh | Somatório do consumo faturado fora ponta |
| SCFP | kWh | Somatório consumo faturado em ponta |
| SCGDFP | kWh | Somatório do consumo mensal GD fora ponta |
| SCGDP | kWh | Somatório do consumo mensal GD em ponta |
| SELM | R\$ | Somatório da economia ao longo dos meses |
| T* | K | Temperatura de referência |
| Ta | °C | Temperatura ambiente |
| TCFP | R\$/kWh | Tarifa de consumo fora ponta |
| TCP | R\$/kWh | Tarifa de consumo em ponta |
| TDFP | R\$/kW | Tarifa de demanda fora ponta |
| TDP | R\$/kW | Tarifa de demanda em ponta |
| TUFP | R\$/kW | Tarifa de ultrapassagem fora ponta |
| TUP | R\$/kW | Tarifa de ultrapassagem em ponta |
| Vca* | V | Tensão de referência em vazio |
| VCB | W | Variável de carregamento das baterias |
| Vmax | V | Tensão no ponto de máxima potência |
| Vmax* | V | Tensão de referência no ponto de máxima potência |
| Vt* | Adimensional | Potencial térmico de referência |
| ηbateria | % | Rendimento da bateria |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1- Arquitetura de uma microrrede..... | 32 |
| Figura 2- Técnicas de gerenciamento de curva de carga..... | 37 |
| Figura 3- Políticas de energias renováveis por países..... | 41 |
| Figura 4- Procedimento para solicitação de conexão..... | 42 |
| Figura 5- Potência instalada por fonte..... | 44 |
| Figura 6- Evolução da potência instalada de GD..... | 45 |
| Figura 7- Estrutura do laço de realimentação..... | 50 |
| Figura 8- Etapas de modelagem..... | 51 |
| Figura 9- Simbologia utilizada no Diagrama de Estoque e Fluxo..... | 53 |
| Figura 10- Ideia geral do modelo proposto..... | 63 |
| Figura 11- Estrutura geral do modelo proposto..... | 64 |
| Figura 12- Modo de referência..... | 65 |
| Figura 13- Diagrama de Laço Causal geral do modelo proposto..... | 66 |
| Figura 14- Estrutura global do modelo computacional..... | 68 |
| Figura 15- Módulo fontes intermitentes..... | 71 |
| Figura 16- Módulo fontes controladas..... | 74 |
| Figura 17- Módulo armazenadores..... | 77 |
| Figura 18- Módulo gerenciamento de demanda..... | 80 |
| Figura 19- Módulo impacto econômico..... | 85 |
| Figura 20- Módulo impacto econômico..... | 86 |
| Figura 21- Curva de demanda..... | 88 |
| Figura 22- Série de dados de temperatura para a região de Santa Maria..... | 89 |
| Figura 23- Série de dados de irradiação para a região de Santa Maria..... | 90 |
| Figura 24- Série de dados de velocidade do vento para a região de Santa Maria..... | 90 |
| Figura 25- Curva de potência do aerogerador..... | 91 |
| Figura 26- Curva de descarga da bateria..... | 93 |
| Figura 27- DEF para o submódulo etanol..... | 95 |
| Figura 28- DEF para o submódulo biodiesel..... | 99 |
| Figura 29- DEF para o fluxo de caixa..... | 101 |
| Figura 30- Radiação e energia solar gerada..... | 103 |
| Figura 31- Temperatura e energia solar gerada..... | 104 |
| Figura 32- Velocidade do vento e energia eólica gerada..... | 104 |
| Figura 33- Comportamento das variáveis no submódulo das baterias..... | 105 |
| Figura 34- Carregamento das baterias..... | 105 |
| Figura 35- Disponibilidade de etanol..... | 106 |
| Figura 36- Disponibilidade de biodiesel..... | 107 |
| Figura 37- Ordem de despacho geradores a biocombustíveis..... | 107 |
| Figura 38- Custo de produção dos combustíveis..... | 108 |
| Figura 39- Geração de energia por biocombustíveis..... | 109 |
| Figura 40 -Demanda com <i>Net Metering</i> | 109 |
| Figura 41- Demanda faturada e após a inserção da GD..... | 110 |
| Figura 42- Redução da demanda para um dia..... | 110 |
| Figura 43- Somatório de geração ao longo dos anos..... | 111 |
| Figura 44- Faturas com e sem GD..... | 111 |
| Figura 45- Fluxo de caixa..... | 112 |
| Figura 46- Energia entregue a rede cenário 1..... | 113 |

| | |
|---|-----|
| Figura 47- Demanda com Net Metering para o cenário 1..... | 114 |
| Figura 48- Comparativo entre demanda faturada e demanda com GD..... | 115 |
| Figura 49- Comparativo entre as faturas com e sem GD..... | 117 |
| Figura 50- Total gerado por ano para os cinco cenários..... | 119 |
| Figura 51- Fluxo de caixa..... | 120 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1- Classificação de geração distribuída de acordo com a fonte e a potência..... | 39 |
| Tabela 2- Classificação dos subgrupos de consumo de energia elétrica. | 46 |
| Tabela 3- Variável do módulo fontes intermitentes. | 70 |
| Tabela 4- Variáveis do módulo fontes controladas. | 73 |
| Tabela 5- Variáveis do módulo armazenadores. | 75 |
| Tabela 6- Variáveis do módulo gerenciamento de demanda..... | 79 |
| Tabela 7- Variáveis do módulo impacto econômico. | 83 |
| Tabela 8- Dados do módulo fotovoltaico. | 91 |
| Tabela 9- Dados baterias. | 93 |
| Tabela 10- Tarifas de energia | 93 |
| Tabela 11- Variáveis submódulo etanol. | 94 |
| Tabela 12- Balanço de massa da reação de produção do biodiesel. | 97 |
| Tabela 13- Custos de produção do biodiesel. | 97 |
| Tabela 14- Variáveis submódulo biodiesel. | 98 |
| Tabela 15- Parâmetros iniciais para o caso base. | 102 |
| Tabela 16- Cenários..... | 113 |

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| 1. INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA | 26 |
| 1.2 OBJETIVOS | 27 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 27 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 27 |
| 1.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO | 28 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO | 28 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 30 |
| 2.1 MICRORREDES | 30 |
| 2.1.1 Integração de recursos energéticos em uma microrrede | 31 |
| 2.2 REGULAMENTAÇÃO DO MERCADO DE GD E MICRORREDES NO CONTEXTO BRASILEIRO E MUNDIAL | 38 |
| 2.2.1 Situação da geração distribuída no Brasil | 43 |
| 2.3 SISTEMA TARIFÁRIO BRASILEIRO | 45 |
| 2.3.1 Modalidades tarifárias | 46 |
| 2.3.2 Bandeiras Tarifárias | 49 |
| 2.4 DINÂMICA DE SISTEMAS | 49 |
| 2.4.1 Princípios da Dinâmica de Sistemas | 49 |
| 2.4.2 Diagrama de Laço Causal | 52 |
| 2.4.3 Diagrama de Estoque e Fluxo | 53 |
| 3 ESTADO DA ARTE | 55 |
| 3.1 GESTÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS E GERENCIAMENTO DE CARGA EM MICRORREDES | 55 |
| 3.2 DESPACHO DE ENERGIA EM MICRORREDES | 57 |
| 3.3 APLICAÇÕES DA DINÂMICA DE SISTEMAS NO SETOR ELÉTRICO | 59 |
| 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO | 61 |
| 4 MODELAGEM CONCEITUAL E MATEMÁTICA DO MODELO | 63 |
| 4.1 MODELO CONCEITUAL PROPOSTO | 63 |
| 4.1.1 Diagrama de Laço Causal proposto | 65 |
| 4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA | 68 |
| 4.2.1 Diagrama de Estoque e Fluxo proposto | 69 |
| 4.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 86 |
| 5 APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO PROPOSTO | 87 |
| 5.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS | 87 |
| 5.1.1 Demanda | 88 |
| 5.1.2 Fontes intermitentes | 89 |
| 5.1.3 Fontes controladas | 91 |
| 5.1.4 Armazenadores | 92 |
| 5.1.5 Tarifas | 93 |
| 5.2 ADEQUAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO | 94 |
| 5.2.1 Submódulo etanol | 94 |
| 5.2.2 Submódulo biodiesel | 96 |
| 5.2.3 Fluxo de Caixa | 100 |
| 5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 101 |
| 5.3.1 Análise de sensibilidade | 102 |

| | |
|--|------------|
| 5.3.2 Cenário referência | 102 |
| 5.3.3 Aplicação de cenários | 112 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 121 |
| 6.1 CONCLUSÕES | 121 |
| 6.2 OPORTUNIDADE DE TRABALHOS FUTUROS..... | 122 |

1. INTRODUÇÃO

O tema dos recursos energéticos distribuídos está cada vez mais conquistando espaço devido aos problemas ambientais e à futura escassez dos combustíveis fósseis, além do advento de tecnologias que viabilizam as redes elétricas inteligentes. Ademais da diversificação das fontes de geração de energia, os recursos energéticos distribuídos englobam armazenamento, eficiência energética e gerenciamento de demanda.

Considerando que o planejamento de uso desses recursos é de suma importância para a correta eficientização do sistema elétrico, o planejamento, o gerenciamento e a operação desses sistemas precisam ser redefinidos, tendo em vista, os recentes desenvolvimentos tecnológicos e alterações regulatórias. Atualmente o foco das pesquisas está no consumidor, com a medição avançada e o gerenciamento de carga, com o principal objetivo de gerenciar os picos de carga para melhorar a qualidade do fornecimento de energia (STRASSER et al., 2015).

Embora o tema das microrredes esteja sendo vastamente discutido, encontrar metodologias que proponham a integração desses recursos sob o ponto de vista econômico, e que englobe além de geração de energia o gerenciamento de demanda é uma tarefa um tanto árdua. Assim, a proposta da presente tese é apresentar a Dinâmica de Sistemas como uma possível solução para essa problemática.

A aplicação da técnica de Dinâmica de Sistemas permite a modelagem de sistemas complexos, propiciando a compreensão do relacionamento entre as variáveis, bem como do comportamento dinâmico do sistema. Possibilita incorporar as relações não lineares do sistema de uma forma facilitada à compreensão de um observador.

Em geral, a solução de um problema é encontrada após a construção de um modelo matemático e posterior aplicação de uma técnica de solução. As principais abordagens utilizadas para solução de problemas segundo Silveira (2001), são:

- Programação matemática: onde estão incluídas a programação linear e não-linear, inteira, dinâmica, entre outras técnicas de otimização;
- Métodos heurísticos: que são as técnicas de inteligência artificial, redes neurais, conjuntos difusos, entre outros;
- Simulação: Monte Carlo e simulação dinâmica.

A abordagem selecionada deve ser baseada no número de alternativas a serem analisadas e no grau de detalhe da modelagem. A simulação geralmente emprega uma

representação detalhada do problema, com isso é indicado para análise de um número pequeno de alternativas. Uma das principais vantagens da simulação é que ela proporciona uma visão geral da operação do sistema, quando comparada com as abordagens matemáticas que fornecem respostas únicas e estáticas (SILVEIRA, 2001). A Dinâmica de Sistemas é uma técnica de simulação matemática, na qual os modelos são baseados em equações, que servem como instruções que indicam como chegar ao próximo instante de operação, a solução do sistema é obtida por etapas de acordo com as equações.

Atualmente o software mais utilizado para modelar os recursos energéticos, visando custos e emissões é o Homer Energy, com ele é possível inserir variáveis de entrada como, custos de componentes, opções tecnológicas e disponibilidade de recursos e obter o funcionamento do sistema e os custos totais do investimento, além de que é possível realizar uma análise de sensibilidade do sistema encontrando a solução mais interessante para o problema em análise. Um exemplo de aplicação deste software pode ser encontrado em (BRENNAN et al., 2018), no qual é feita uma análise econômica acerca da implementação de uma microrrede em uma zona rural de Ontário, no Canadá.

Entretanto, com esse software só é possível modelar um sistema aberto, onde as saídas respondem as entradas, ou seja, somente as entradas influenciam na saída, enquanto que em DS é possível modelar um sistema fechado, isto é, com realimentação, onde uma ação passada pode interferir em uma futura (SILVEIRA, 1997), além disso, no Homer não há possibilidade de gerenciamento de demanda.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Um dos principais impasses na utilização dos recursos energéticos é o aspecto econômico, escolher o tipo de fonte e a finalidade da instalação da GD, por exemplo, se será geração de *backup* ou para suprir a totalidade da carga, envolve algumas incertezas que precisam ser analisadas antes da instalação, por isso, o planejamento deve ser feito com cautela. As metodologias atualmente utilizadas possuem algumas restrições, como, não considerarem variáveis qualitativas e não realizarem análise tarifária.

Além disso, as variáveis de um sistema geralmente possuem relações lineares e não lineares entre si, sendo que as relações lineares são mais facilmente compreendidas, tendo em vista que o incremento em uma variável leva a um incremento proporcional em outra variável

dependente desta, enquanto que a não linearidade apresenta um comportamento mais complexo, podendo ocorrer grandes variações para pequenas mudanças (ALVES, 1997). Portanto, para uma correta representação de um sistema é necessário modelar também as relações não lineares, principalmente em horizontes de médio e longo prazo (HAHN; MEYER-NIEBERG; PICKL, 2009).

Tendo em vista essas questões, o presente trabalho visa apresentar um modelo que permita a integração dos recursos energéticos de um determinado local realizando o gerenciamento de demanda, a partir da técnica de Dinâmica de Sistemas. É demonstrada a inserção de diversas variáveis e testes de políticas, com a finalidade de auxiliar no processo de decisão da implantação de microrredes, tendo em vista a viabilidade e o retorno financeiro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de Dinâmica de Sistemas para agregação de fontes de geração de energia, armazenadores, resposta da demanda e viabilidade econômica de uma microrrede. Realizando o gerenciamento energético da microrrede para um sistema conectado a rede da concessionária.

1.2.2 Objetivos específicos

- Modelar fontes intermitentes, como, solar e eólica;
- Modelar fontes com despacho controlado, utilizando combustíveis armazenáveis, como biodiesel e etanol;
- Modelar os armazenadores, no caso as baterias;
- Realizar o gerenciamento de demanda, obtendo o valor que será economizado com a implantação da microrrede;
- Analisar a expansão do sistema, bem como os ajustes tarifários que poderão ser feitos com base na autossuficiência energética.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A principal contribuição deste trabalho está na apresentação de um modelo dinâmico que integra a operação de recursos energéticos, desde a fonte primária até sua conversão, e propicia o planejamento da expansão para atingir a autossuficiência e operar como uma microrrede.

Com o modelo é possível obter a viabilidade econômica da integração de recursos energéticos e fornecer assim a melhor configuração de geração de energia com base nos dados de demanda e economia obtida. Sendo que a principal vantagem é a possibilidade da inserção de novas variáveis e facilidade na adaptação do modelo, frente a novos cenários e projetos.

O modelo utiliza a abordagem *bottom-up*, que tem como particularidade a análise detalhada dos processos, partindo da instancia inicial até a final, o que difere do Planejamento Integrado de Recursos (PIR) que utiliza uma abordagem *top-down*, isto é, analisa o sistema de forma geral, da instancia final para a inicial. No PIR a análise é feita de forma global, no qual são analisados fatores sociais, econômicos, ambientais, políticos e técnicos. Já no modelo proposto o sistema é focado na análise econômica de forma minuciosa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em seis capítulos, incluindo este introdutório, como indicado na sequência.

No capítulo 2 são abordados os conceitos mais importantes de recursos energéticos distribuídos, visando contextualizar o modelo desenvolvido. Além dos conceitos de geração distribuída, gerenciamento de demanda e microrredes, é apresentada a regulamentação do mercado de GD e microrredes e o sistema tarifário brasileiro, esses conceitos serão a base para o desenvolvimento da metodologia.

No capítulo 3 é apresentado o estado da arte, no qual é possível destacar os principais trabalhos desenvolvidos acerca do tema. O capítulo está dividido em: Gestão de recursos energéticos e gerenciamento de carga; Despacho de energia em microrredes e; Integração de recursos energéticos com Dinâmica de Sistemas.

No capítulo 4 os princípios da Dinâmica de Sistemas são discutidos para posterior aplicação no modelo. A modelagem conceitual é apresentada, assim como os Diagramas de Laço Causal.

No capítulo 5 a modelagem matemática é apresentada, bem como os Diagramas de Estoque e Fluxo de cada subsistema que compõe a microrrede.

O capítulo 6 apresenta uma aplicação prática do modelo proposto, o estudo visa a obtenção do retorno financeiro da instalação de geração distribuída no campus da Universidade Federal de Santa Maria, utilizando os recursos disponíveis na própria universidade.

Por fim, o capítulo 7 discute as principais conclusões do trabalho, assim como os trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir da presente tese.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma fundamentação conceitual referente aos principais assuntos abordados na metodologia, que servem como base para a contextualização técnica do modelo proposto. Entre os tópicos abordados estão os conceitos fundamentais de microrredes e a integração de diferentes recursos, a regulamentação do mercado no Brasil e a constituição do sistema tarifário brasileiro.

2.1 MICRORREDES

A fim de promover uma integração entre os recursos um novo conceito vem sendo desenvolvido, as chamadas microrredes, que formam um sistema de potência em escala reduzida, normalmente com baixa potência e baixa tensão. Questões como a escassez de combustíveis fósseis, instalação generalizada das tecnologias de geração distribuída, consciência social sobre o impacto ambiental e desenvolvimentos tecnológicos estão transformando as microrredes em um cenário emergente para geração de energia elétrica a nível mundial. Além disso, o baixo fator de capacidade dos recursos de geração distribuída tem motivado a necessidade de integração dos diferentes tipos de fontes e cargas na forma de microrredes, para aumentar a confiabilidade e também para reduzir o carregamento do sistema convencional de transmissão e distribuição (BASAK et al., 2012).

O conjunto de cargas e fontes de pequeno porte, instalados em um determinado local, operando como um único sistema controlável denomina-se microrrede. As microrredes apresentam capacidade de gerenciar recursos energéticos distribuídos, visando benefícios próprios ou da rede de distribuição no qual estão conectados (BRANDÃO et al., 2018).

Uma microrrede composta por diferentes recursos energéticos pode assumir diversas configurações. Geralmente opera conectada à rede da distribuidora, sendo totalmente ou parcialmente suprida por esta rede ou injetando potência nesta. Entretanto também pode ser utilizada em situações de emergência, como, por exemplo, em tempestades ou quedas de energia, onde uma chave pode separar a microrrede da rede pública, operando então como uma ilha (AZIZ et al., 2015). Além de atender a demanda de energia elétrica, pode também ser capaz de suprir a necessidade de energia térmica do sistema, desde que possua fontes para tal geração.

Segundo (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018), alguns dos principais benefícios obtidos com as microrredes são: segurança energética, economia e integração de fontes não poluentes. Além de benefícios para o consumidor a instalação de microrredes acarretará em uma redução nas perdas de energia, ocasionando um efeito direto sobre o lucro das distribuidoras, pois em geral, as distribuidoras de energia possuem um incentivo econômico para reduzir as perdas em suas redes. Esse incentivo é a diferença entre as perdas reais e padrão, se as perdas reais forem maiores do que as perdas padrão a concessionária é penalizada, caso aconteça o contrário, elas obtêm um lucro (AZIZ et al., 2015). Assim, por exemplo, a análise do fluxo de potência em um sistema composto por uma microrrede pode fornecer o impacto econômico sobre os sistemas de distribuição e transmissão a partir do cálculo das perdas. Ainda sob o ponto de vista da concessionária, pode ser vantajosa pois oferece energia despachável para a utilização nas horas de pico, aliviando o sistema de distribuição e postergando investimentos de ampliação (HATZIARGYRIOU et al., 2009).

Manter a confiabilidade de um sistema com forte penetração renovável é um grande desafio, tendo em vista as características estocásticas das fontes de energia presentes em uma microrrede, dentre esses desafios está a incompatibilidade de energia, isto é, a geração geralmente não é igual a demanda, contudo, algumas alternativas são aplicadas para solucionar este problema, como, utilização de fontes complementares, geração controlável, resposta à demanda e armazenamento de energia (DONG et al., 2016). O sistema proposto na presente tese utiliza todas as alternativas em único modelo, sendo que estas podem ser alteradas de acordo com a disponibilidade do local.

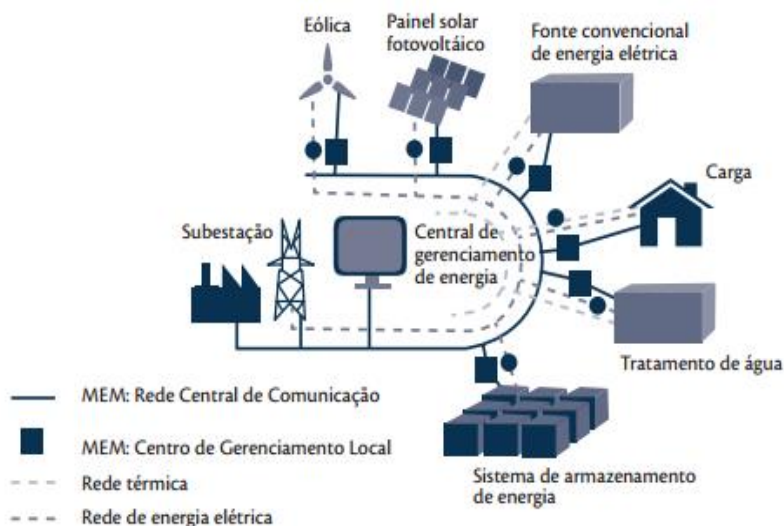
2.1.1 Integração de recursos energéticos em uma microrrede

A diversificação dos recursos distribuídos está mudando a forma de transmissão de energia, permitindo que os consumidores tenham mais flexibilidade, contudo, exigem que o sistema seja convertido em um sistema integrado (BASAK et al., 2012). O aumento drástico da carga, devido a entrada de equipamentos consumidores de energia elétrica no dia-a-dia, como, veículos elétricos, sistemas avançados de aquecimento, ventilação e ar condicionado, impõe cargas significativas a rede elétrica, assim, as microrredes integrando geração distribuída, infraestrutura de medição e tecnologia da informação podem ser uma solução (JIANG; FEI, 2015). A capacidade instalada de uma microrrede deve ser capaz de atender a máxima demanda

(pico) e também dispor de capacidade suficiente para lidar com as incertezas quanto à disponibilidade de geração e aumentos imprevisíveis de demanda (STRBAC, 2008).

A estrutura típica de uma microrrede (Figura 1) é constituída de várias fontes de geração de energia, armazenadores, cargas, dispositivos de controle das fontes, das cargas e de conexão e reconexão, no qual permite as atividades de ilhamento e reconexão da microrrede a rede da concessionária, e centro de gerenciamento de energia. O centro de gerenciamento de demanda atua no controle da microrrede, realizando o gerenciamento da compra e venda de energia, na previsão de carga em curto prazo, no despacho de potência ativa e controle de tensão, na garantia de que as cargas sejam atendidas adequadamente, na maximização da eficiência da microrrede e redução das emissões e perdas (FALCÃO, 2009).

Figura 1- Arquitetura de uma microrrede.



Fonte: CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2012.

A arquitetura de cada rede pode ser classificada como centralizada, no qual um controlador central é responsável pelo despacho de energia, ou descentralizada em que cada recurso opera de forma autônoma (BRANDÃO et al., 2018). A seguir serão apresentados os principais recursos que podem ser inseridos em uma microrrede.

2.1.1.1 Tecnologias para geração de energia em uma microrrede

Apesar das fontes limpas serem mais utilizadas, outros tipos de geração são utilizadas para compor uma microrrede. A diversificação de fontes de energia permite o aumento da segurança e confiabilidade do sistema, além de reduzir a dependência das incertezas políticas e de mercado. Contudo, quanto maior a variedade de fontes, mais complexo torna-se o sistema, principalmente do ponto de vista de operação e planejamento. A seguir são apresentadas as principais tecnologias utilizadas.

➤ *Energia Fotovoltaica*

A energia elétrica é produzida a partir de módulos constituídos de células fotovoltaicas, que tem a função de converter a irradiação solar em energia elétrica através de uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor. As células fotovoltaicas são conectadas em série ou paralelo, dependendo das tensões e correntes requeridas, dando origem ao módulo fotovoltaico. Contudo, um sistema fotovoltaico não é constituído apenas por módulos, os demais equipamentos dependem do tipo de instalação que será feito, podendo ser *on grid* ou *off grid*.

Nos sistemas conectados à rede, ou *on grid*, a conexão com a rede de distribuição se dá pelo inversor de conexão à rede, que faz a conversão de corrente contínua para corrente alternada. Nesse caso, é dispensável o uso de um sistema de armazenamento, com baterias e controladores de carga, e todo excedente de energia produzida é enviado à rede.

Já nos sistemas isolados, ou *off grid*, não há conexão com a rede de distribuição. São sistemas autônomos que dependem de baterias para armazenar os excedentes de energia produzida, para uso em momentos de baixa ou nenhuma produção. O sistema é composto por módulos fotovoltaicos, inversor, controlador de carga e baterias. O custo desse sistema é mais elevado, quando comparado à sistemas *on grid*.

Além destes dois sistemas, a energia fotovoltaica também pode ser utilizada em sistemas híbridos de energia, onde são associadas outras fontes de geração em um único sistema.

➤ *Energia Eólica*

Energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, sua produção é a partir da transformação da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, através das turbinas eólicas (ANEEL, 2005).

Na produção de energia eólica, assim como na energia fotovoltaica, é possível ter os três tipos de sistemas *on grid*, *off grid* e também híbridos. Os equipamentos são os mesmos com exceção dos módulos fotovoltaicos, que neste caso, são substituídos por aerogeradores. A escolha do tipo de aerogerador que será utilizado depende da altura em que será instalado e da velocidade do vento. A quantidade de energia produzida depende basicamente de três fatores, velocidade do vento, diâmetro do rotor e do rendimento de todo o sistema.

➤ *Microturbinas*

A denominação microturbina é dada a um sistema com dimensões reduzidas composto por compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico, com potência máxima de 500 kW (DIAS, 2005). Os combustíveis para alimentação desse tipo de turbina são diversos podendo ser na forma gasosa, como, por exemplo, o gás natural e o propano, ou na forma líquida como o diesel, gasolina ou o querosene (JURADO; ORTEGA; CANO, 2002).

Contudo, as microturbinas são na maioria turbinas a gás e podem ser unidades de simples estágio, fluxo radial com velocidades de rotação entre 90.000 e 120.000 rpm, como também de múltiplos estágios e/ou menores velocidades de rotação. Podem ser utilizadas em *standby*, para atendimento de cargas de pico e melhoria de qualidade e confiabilidade de energia, bem como para aplicações de cogeração. A eficiência dessas turbinas fica entre 20% e 30% com recuperação de calor, 15% sem recuperação de calor e até 85% com cogeração (COSTAMAGNA; MAGISTRI; MASSARDO, 2001).

Diferem das turbinas convencionais por apresentarem baixa potência, ciclo de combustão simplificado, menor taxa de compressão e um eixo do rotor com dimensões reduzidas com o gerador acoplado em uma das extremidades.

➤ *Motores de combustão interna alternativos*

Os motores alternativos de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas que convertem em energia mecânica a energia química através de combustão, essa combustão impulsiona um conjunto pistão, biela e virabrequim (MARTÍNEZ, 2009).

Em geral possuem uma eficiência que varia entre 25 e 45%. Os MCI podem operar a quatro tempos, em que necessitam de duas rotações para completar um ciclo, ou a dois tempos onde o ciclo é completo com apenas uma rotação. Os motores de dois tempos, apesar de serem mais baratos, quando comparados a um de quatro tempos de mesma capacidade, são menos utilizados, devido a sua menor eficiência causada pelas perdas de combustível no escape do motor (DIAS, 2005).

Os MCI são divididos em duas categorias: motores de ignição por compressão, onde o ar é comprimido em pressões e temperaturas que facilitam a ignição do combustível que depois de injetado explode espontaneamente, e motores de ignição por centelha, onde a mistura de ar e combustível gasoso é comprimida até que a temperatura da mistura fique abaixo do ponto de ignição, após a mistura é incendiada por uma vela de ignição. Os motores de ignição por centelha são leves e de baixo custo, desta forma são mais utilizados para potências de até 225 kW, já os motores de ignição por compressão são mais utilizados para potências relativamente altas e que necessitam de economia de combustível (DA COSTA, 2007).

2.1.1.2 Armazenadores de energia

Com esse novo padrão do setor elétrico e a intermitência das fontes renováveis, como eólica, solar e das marés, tem-se buscado formas de mover a energia através do tempo. Uma dessas alternativas é o uso de armazenadores de energia. Esses armazenadores permitem o acúmulo de energia nos períodos de geração excessiva para posterior utilização nos momentos de maior consumo, oferecendo assim benefícios substanciais para a operação do sistema. A implantação de armazenamento pode evitar ou adiar a necessidade de melhorias específicas na transmissão e / ou adição de novos recursos de geração.

A ampliação do uso dos sistemas de armazenamento depende do desenvolvimento de modelos, metodologias e ferramentas apropriados e da formulação de iniciativas políticas eficazes (DEGEILH; GROSS, 2015). De forma direta e indireta os armazenadores contribuem para a operação e gerenciamento do sistema, aumentando o uso das fontes renováveis e

tornando o sistema mais eficiente e confiável. Os principais tipos de armazenadores são (ALAMRI; ALAMRI, 2009):

- O PHS (*Pumped Hydro Storage*);
- O armazenamento de Hidrogênio;
- O Sistema de armazenamento de ar comprimido;
- *Os Flywheels*;
- Os Supercapacitores;
- O SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*);
- As Baterias.

As principais características que devem ser levadas em consideração na escolha do armazenador são o custo do capital inicial, custo de funcionamento, a eficiência de carga e descarga, capacidade de armazenamento, ciclos de descarga e tempo de vida útil.

2.1.1.3 Gerenciamento de demanda

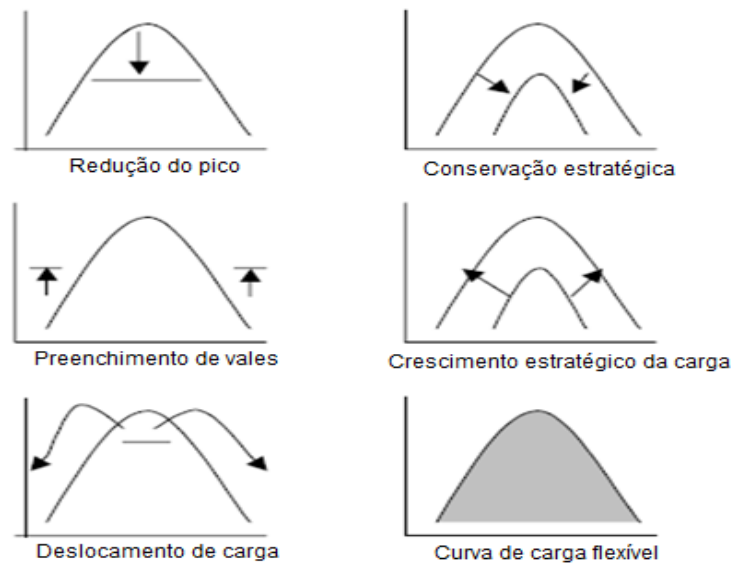
O conceito de gerenciamento pelo lado da demanda (*demand-side management*) foi desenvolvido por Clark W. Gellings em meados dos anos 70 e publicado no livro intitulado *Demand-Side Management: Concepts and Methods* escrito por Clark W. Gellings e John H. Chamberlin e publicado em 1993. Nesse livro as atividades de GLD, ou *DSM* em inglês, são descritas como aquelas que envolvem ações junto aos consumidores, essas atividades incluem o gerenciamento de carga, conservação estratégica, eletrificação e estratégias para o crescimento da participação no mercado, ressaltando o uso eficiente dos recursos e reduzindo os custos para a concessionária e para o consumidor.

Embora esse tema tenha sido discutido a mais de 40 anos, na última década ganhou ainda mais atenção com o advento das fontes renováveis de energia e as microrredes. O avanço da tecnologia da informação (TI), sistemas automáticos de controle e supervisão para aplicação nas microrredes ampliou as possibilidades de GLD, tendo em vista que essas tecnologias são integradas ao sistema elétrico de potência possibilitando uma melhor interação entre os diversos agentes do mercado de energia (SIEBERT et al., 2012).

Existem dois tipos de GLD, o GLD direto, em que a concessionária atua na determinação de quais cargas devem ser desconectadas e o GLD indireto, no qual o consumidor

é quem gerencia sua demanda em virtude das políticas adotadas pela concessionária. Essas políticas podem incluir tarifas variáveis, eficiência energética e resposta a demanda. Gellings (1985) aponta seis possibilidades, apresentadas na Figura 2, para modelar a curva de carga.

Figura 2- Técnicas de gerenciamento de curva de carga.



Fonte: Adaptado de (GELLINGS, 1985).

A redução de pico é referente à redução da carga de pico, geralmente é realizado através do controle direto pela concessionária de energia, esse controle é utilizado para reduzir os custos de operação e a dependência de fatores como combustíveis e água. O preenchimento de vales é quando precisa-se completar os vales fora do horário de pico, já o deslocamento de carga é quando é necessário o deslocamento da carga para o horário fora ponta. A conservação estratégica é geralmente incentivada pela troca de aparelhos no uso final da energia, enquanto o crescimento estratégico de carga proporciona um crescimento da demanda energética estimulada pela concessionária. E, por último, a curva de carga flexível que está relacionada à confiabilidade e qualidade do serviço e envolvem programas de carga interruptível, gerenciamento integrado de energia e aparelhos individuais de controle.

O gerenciamento de carga, na maioria das vezes, não é considerado durante a fase de planejamento, tendo em vista a complexidade das diversas variáveis presentes, entretanto, nas

microrredes esse gerenciamento se torna mais simplificado, considerando que as cargas são mais previsíveis e gerenciáveis.

O planejamento e o desenvolvimento da estratégia de GLD são feitos geralmente pela concessionária, no entanto, outros implementadores, como organizações governamentais e órgãos reguladores, grupos com ou sem fins lucrativos ou até mesmo uma colaboração de diferentes partes interessadas, também podem participar da elaboração das ações de GLD (RAHMAN et al., 2016).

2.2 REGULAMENTAÇÃO DO MERCADO DE GD E MICRORREDES NO CONTEXTO BRASILEIRO E MUNDIAL

No Brasil existe uma série de normativas regulamentando o mercado de energia elétrica, contudo, se tratando de geração distribuída existem duas principais que definem e norteiam este tipo de geração. A primeira é o Decreto n ° 5.163/2004 que define geração distribuída, no âmbito de alta e média tensão (Grupo A), a qualquer empreendimento de geração conectado diretamente ao sistema elétrico de distribuição, exceto plantas hidrelétricas com capacidade instalada superior a 30 MW e termelétricas com eficiência energética inferior a 75% (termelétricas movidas à biomassa ou resíduos de processos não estão limitadas a esta eficiência). A segunda normativa, no âmbito da média e baixa tensão (Grupo B), é a Resolução n°. 687/2015 da ANEEL que define microgeração como central geradora de energia elétrica que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia, com capacidade instalada menor ou igual a 75 kW e minigeração distribuída como empreendimento de geração de energia elétrica com potência instalada entre 75 kW e 3 MW para fontes hídricas e menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis e cogeração qualificada.

A Tabela 1 apresenta a classificação regulatória de geração distribuída segundo a capacidade instalada e o tipo de fonte, sendo que a marcação em linha pontilhada representa a micro e minigeração em baixa ou em média tensão e em linha contínua a geração conectada em média ou alta tensão, a partir de fontes renováveis incentivadas e a partir do gás natural (BRITO et al., 2015).

Tabela 1- Classificação de geração distribuída de acordo com a fonte e a potência.

| Fonte vs. Porte (MW): | Tipo de geração | | | | |
|--------------------------|---|--|--|--|---|
| Hidro | <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> Microgerador (Até 0,075) </div> | <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> Minigerador (0,075 a 3) </div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Geração Incentivada: Autoprodutor, Produtor Independente (3 a 5) </div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Geração Incentivada: Autoprodutor, Produtor Independente. (5 a 30) </div> | Geração de Grande Porte: Autoprodutor, Produtor Independente. (Maior que 30) |
| Biomassa | | | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Minigerador (3 a 5) </div> | | |
| Eólica | | | GD | | |
| Fotovoltaica | | | GD | | |
| Gás natural | | | GD | | |
| Carvão | GD | | Convenção: Autoprodutor, Produtor Independente. (5 a 30) | | |
| Diesel | Geração Backup (Até 0,1) | Autoprodutor (0,1 a 5) | | | |
| Óleo comb. | | | | | |

Fonte: Adaptado de (BRITO et al., 2015).

As normativas referentes a geração incentivada e a geração distribuída convencional são regidas pela Lei nº 9.427/1996 e pelas Resoluções Normativas 247/2006 e 167/2005. A comercialização de energia a partir da geração distribuída convencional pode ser feita nos dois ambientes de comercialização: Ambiente de Contratação Livre (ACL), onde a negociação é livre entre compradores e vendedores e; Ambiente de Contratação Regulado (ACR), em que a comercialização é feita através de leilões de energia promovidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Os leilões também são utilizados para a comercialização da energia produzida pelos participantes do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), este programa contempla pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), usinas eólicas e usinas de biomassa. Na geração incentivada, a qual estimula a geração de energia proveniente de fontes renováveis através de descontos, não inferiores a 50%, na Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição (TUSD) ou na Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Transmissão (TUST), a comercialização de energia é realizada no ACL por meio de Contratos de Compra de Energia Incentivada (CCEI) (L. C. DE GODOI, R. C. LOTERO, 2014).

Com relação a mini e microgeração a normativa que estabelece as condições gerais para implantação desse tipo de geração é a Resolução Normativa nº. 687/2015, que é uma revisão da Resolução Normativa nº. 482/2012 publicada pela ANEEL com o intuito de diminuir as

barreiras para a conexão das pequenas centrais geradoras na rede de distribuição. A REN n° 687/2015 aponta as diretrizes para a entrada da mini e microgeração no mercado de energia elétrica, bem como para o sistema de compensação utilizado pelas concessionárias.

O sistema de compensação de energia adotado no Brasil é semelhante ao *net metering* utilizado em alguns países, isto é, há uma geração de créditos e não há comercialização direta da energia produzida. O conceito de *net metering* teve origem nos Estados Unidos da América (EUA), em 1983, e permite aos clientes de uma determinada concessionária compensar uma parte ou a totalidade dos seus consumos por meio da sua energia gerada (ALVES, 2014). Através de um medidor bidirecional é possível medir em kWh a quantidade de energia consumida e injetada na rede, assim no final de cada período de faturamento, o consumidor é cobrado apenas pelo seu consumo líquido. Se a energia produzida for maior que a consumida, o consumidor receberá uma compensação, que poderá ser na forma de créditos de energia ou monetários. No caso do consumidor receber um valor monetário denomina-se *net-billing* e o valor da energia injetada na rede é inferior ao da energia consumida (TAVARES, 2016). No sistema brasileiro não há compensação monetária. Além dos custos referentes a energia elétrica, em caso de diferença negativa entre a energia gerada e consumida, será cobrado, no mínimo, para o grupo B o valor do custo de disponibilidade da rede, e para o grupo A o valor da demanda contratada. O consumidor terá o crédito em energia, referente a diferença positiva entre energia injetada e a consumida, por um prazo de 60 meses, caso o empreendimento seja com múltiplas unidades consumidoras, os créditos podem ser transferidos para outra unidade.

Existem diversas variantes do termo *net metering*. As principais diferenças são devido ao método de compensação, por exemplo, no *time of use metering (TOU)* é empregado um contador inteligente reversível que determina o uso da energia elétrica em qualquer horário do dia, com isso os preços da energia variam de acordo com o horário de utilização e também com a estação do ano. Nos sistemas denominados *Market Rate net metering* a utilização da energia elétrica é faturada de forma dinâmica com base nos preços da eletricidade e os medidores são programados para calcular e ler este valor remotamente. Já no sistema *Virtual net metering* é possível compensar os consumos energéticos em outras instalações, desde que os clientes pertençam à mesma distribuidora (POULLIKKAS, 2013).

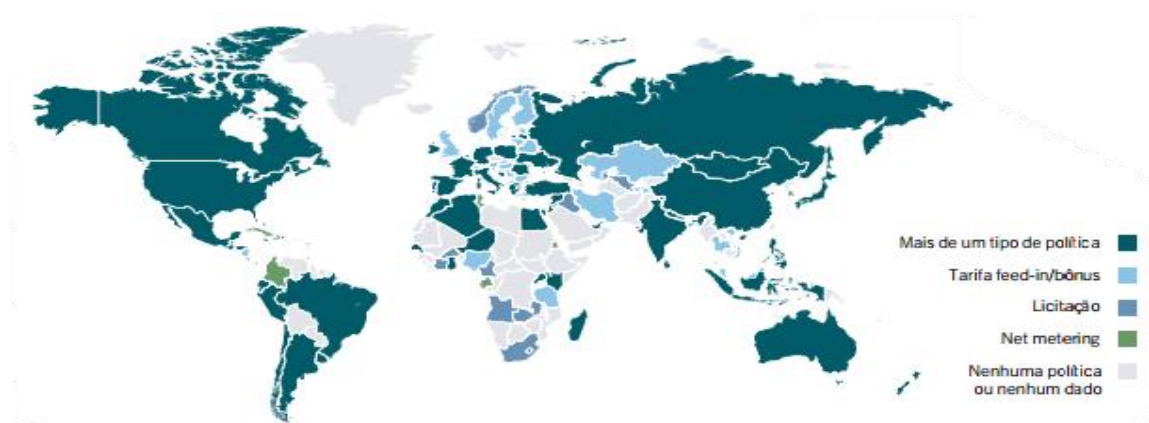
O sistema *net metering* está implantado em pelo menos 10 países e em 43 estados dos Estados Unidos (OLIVEIRA, 2016). Além dos EUA, o Japão e alguns países da Europa

adotaram este sistema. Contudo, apesar do princípio de funcionamento ser o mesmo, existem algumas diferenças entre os sistemas adotados em cada país.

Apesar do sistema *net metering* ser uma política simples e menos dispendiosa, outro sistema de tarifas também é muito utilizado, chamado *feed-in*, que consiste no pagamento de um valor, por kWh, mais vantajoso para o gerador que utilizar fontes renováveis. De forma pré-estabelecida, os custos extras de incentivo a estes produtores são distribuídos entre todos os consumidores (LANDEIRA, 2013). Neste sistema são realizados contratos de compra de energia elétrica em longo prazo, com preços fixos para a venda e garantia de despacho de toda a energia gerada, além de que o pagamento é feito com base nos custos de produção da tecnologia.

Este mecanismo de tarifa já é utilizado em mais de 50 países a fim de incentivar os investimentos em energias renováveis e se popularizou após a Lei Alemã de Energias Renováveis de 2000, que estabeleceu as diretrizes de acesso de empreendimentos de fontes renováveis à rede. Na Europa, as tarifas *feed-in* já tem sido utilizadas, além da Alemanha, em países como Itália, República Tcheca, Reino Unido, França e Espanha (LANDEIRA, 2013). Na Figura 3 é apresentado um panorama mundial sobre as políticas de incentivo às fontes renováveis. Nesta figura além das políticas de *net metering* e *feed-in* estão incluídos os leilões de energia ou licitações.

Figura 3- Políticas de energias renováveis por países.

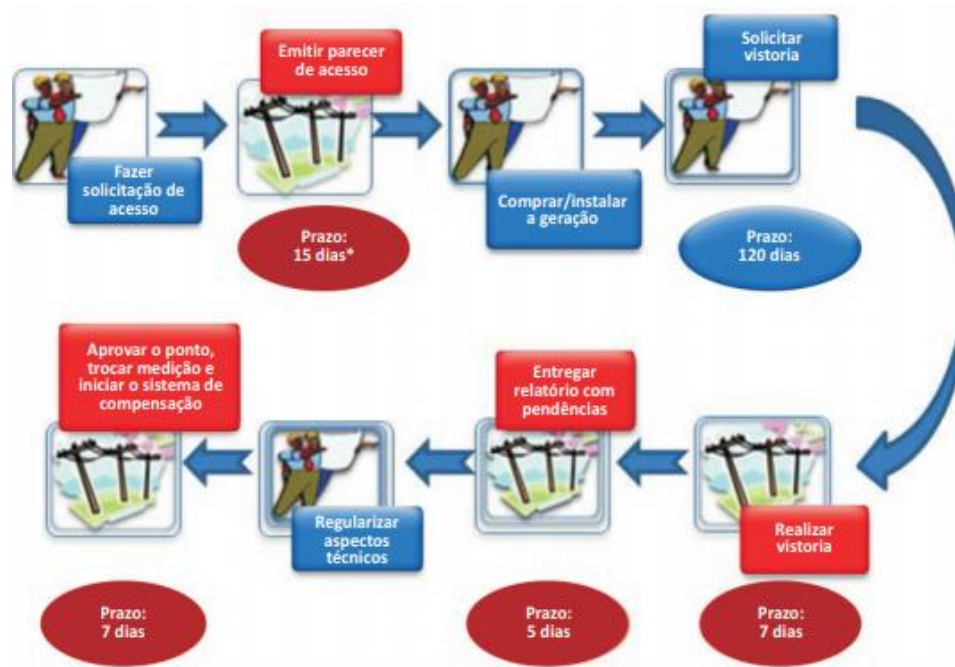


Fonte: REN21, 2016.

Todas essas políticas visam impulsionar a utilização de fontes renováveis para geração de energia, no Brasil outra forma criada para incentivar a mini e microgeração de energia, a partir do Convênio Confaz ICMS 16/2015, é a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), e da cobrança do Programa Integração Social (PIS), e da Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), para o consumidor que optar por gerar sua própria energia por meio de fontes renováveis, desta forma, o consumidor não é tributado pela energia injetada na rede, ou seja, a cobrança dessas taxas é apenas sobre a diferença entre energia consumida e a energia injetada na rede. Além do Distrito Federal, dezenove dos vinte e seis estados brasileiros já aderiram ao convênio.

O Módulo 3 do PRODIST estabelece as diretrizes para conexão do sistema a rede de distribuição, são necessários alguns procedimentos para que a central geradora seja considerada micro ou minigeração, como mostra a Figura 4. As obrigações do consumidor são destacadas em azul, enquanto da distribuidora são expostos em vermelho.

Figura 4- Procedimento para solicitação de conexão.



Fonte: ANEEL, 2016.

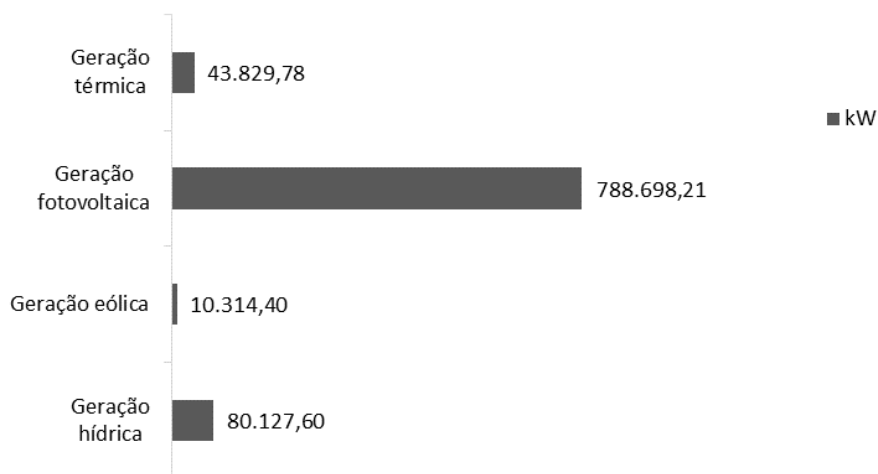
O sistema de medição deve ser bidirecional e pode ser composta por dois medidores unidirecionais ou por um único que consiga medir a potência ativa consumida e também a gerada. No caso da microgeração a distribuidora é responsável por adquirir e instalar o equipamento, enquanto que na minigeração o acessante é o responsável pelos custos da adequação (ANEEL, 2016).

2.2.1 Situação da geração distribuída no Brasil

Embora o conceito de microrredes venha sendo discutido a alguns anos, a sua implementação ainda se encontra nos estágios iniciais. Além do avanço da tecnologia, um dos fatores que mais tem contribuído para a difusão das microrredes é o aumento do número de instalações de geração distribuída, que possibilitou uma redução nos custos de aquisição dos equipamentos.

Dados da ANEEL mostram que dos 922 MW de potência instalada em maio de 2019, 788 MW são provenientes de geração fotovoltaica, 43 MW de geração térmica, 10 MW de eólica e 80 MW de hidráulica, como mostra a Figura 5 (ANEEL, 2019). Apesar de o país possuir um elevado potencial para produção de energia proveniente de geração eólica, este recurso não é muito utilizado para GD devido às baixas velocidades do vento em áreas urbanas, além dos custos de aquisição dos equipamentos e instalação que ainda são considerados altos para este tipo de aplicação.

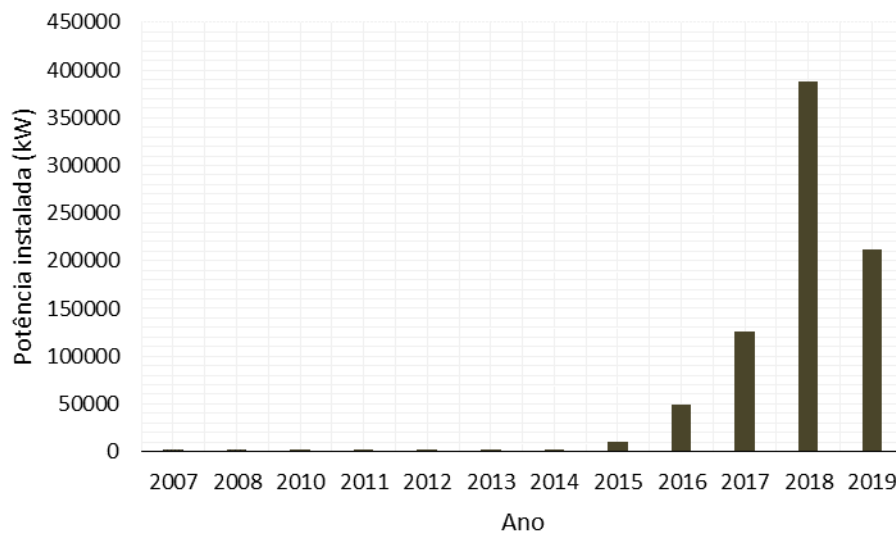
Figura 5- Potência instalada por fonte.



Fonte: ANEEL, 2019.

Desde abril 2012, quando foi criado o Sistema de Compensação de Energia, a instalação de GD vem crescendo anualmente, como mostra a Figura 6, entretanto os maiores avanços foram a partir do ano de 2016, em que a potência instalada passou de 9.632 MW para 49.524 MW, isto significa um aumento de 39.892 MW que corresponde a 514% de acréscimo. Esse aumento significativo é devido, principalmente, à redução dos custos das tecnologias e também às políticas de incentivo a geração renovável estabelecidas no país, que ocasionou recentes mudanças na Resolução N° 482/2012, que trata de mini e microgeração, e do Convênio ICMS N° 06/2013, que aborda a isenção de impostos para geradores de pequeno porte.

Figura 6- Evolução da potência instalada de GD.



Fonte: ANEEL, 2019.

O setor que mais se destaca na instalação de GD é o comercial com 401 MW de potência instalada, seguido pelo residencial com 286 MW, industrial com 120 MW, rural com 94 MW e poder e serviço público, cada um com 18 e 2 MW, respectivamente. A iluminação pública responde por somente 239 kW de potência instalada. Os três estados brasileiros que mais se destacam em quantidade de unidades de geração distribuída bem como em potência instalada são Minas Gerais, Rio Grande do Sul e São Paulo, com uma potência instalada de, respectivamente, 204 MW, 134 MW e 104 MW.

2.3 SISTEMA TARIFÁRIO BRASILEIRO

Com o intuito de aplicar diferentes tarifas aos consumidores, as unidades consumidoras do sistema elétrico brasileiro são divididas em oito classes, baseadas na curva de carga típica de cada classe, sendo definidas como: Residencial, Comercial, Industrial, Rural, Poder Público, Serviço Público, Iluminação Pública e Consumo Próprio.

Essas classes de consumo servem como base para a definição dos grupos de consumidores que sustentam as tarifas de energia. O sistema tarifário possui dois grandes grupos, Grupo A que possui tarifa binômica e Grupo B que possui tarifa monômica. As tarifas monômicas são definidas apenas com base na energia consumida, enquanto que as tarifas binômicas, são baseadas em dois componentes, consumo de energia e a demanda máxima de

potência requerida (PIRES; PICCININI, 1998). O grupo A é formado por consumidores atendidos em tensão superior a 2,3 kV ou sistemas subterrâneos de distribuição, enquanto que o grupo B é composto por unidades consumidoras com tensão inferior a 2,3 kV. Os grupos de consumo A e B são subdivididos como mostra a Tabela 2.

A tarifa de energia abrange todos os itens necessários para geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, assim, a tarifa de fornecimento de energia da distribuidora é dividida em tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) e tarifa de energia (TE).

A TUSD está relacionada com os custos do sistema de distribuição, encargos setoriais, remuneração dos investimentos e suas depreciações. Esta tarifa é paga por todos os consumidores conectados à distribuidora (consumidores cativos e livres¹), enquanto que a TE é cobrada somente dos consumidores cativos e inclui os custos de compra de energia elétrica (FUGIMOTO, 2010).

Tabela 2- Classificação dos subgrupos de consumo de energia elétrica.

| Grupo | Subgrupo | Tensão de fornecimento (kV) |
|----------------|----------|--|
| Grupo A | A1 | Igual ou superior a 230 |
| | A2 | De 88 a 138 |
| | A3 | 69 |
| | A3a | De 30 a 44 |
| | A4 | De 2,3 a 25 |
| | AS | Inferior a 2,3 a partir de sistema de distribuição subterrâneo |
| Grupo B | B1 | Inferior a 2,3 – Residencial |
| | B2 | Inferior a 2,3 – Rural |
| | B3 | Inferior a 2,3 – Demais classes |
| | B4 | Inferior a 2,3 – Iluminação Pública |

Fonte: Elaboração própria com os dados de (ANEEL, 2010).

2.3.1 Modalidades tarifárias

Ao conjunto de tarifas aplicadas aos consumidores dos Grupos A e B dá-se o nome de modalidade tarifária, que pode ser dividida em dois grupos: Modalidade Convencional (apenas para o grupo B) e Modalidades Horárias (Branca, Azul ou Verde).

¹ Consumidores cativos compram a energia das concessionárias de distribuição, enquanto consumidores livres compram energia diretamente dos geradores ou comercializadores.

2.3.1.1 Modalidade Convencional

Nesta modalidade a aplicação da tarifa independe da hora do dia na qual a energia é utilizada. A tarifa convencional monômnia é aplicada as unidades consumidoras do grupo B e é composta de um valor para o consumo de energia, em reais por kilowatt-hora (ANEEL, 2010).

A fatura de energia desses consumidores é composta da soma das seguintes parcelas:

- Tarifa de consumo multiplicado pelo consumo medido.

2.3.1.1 Modalidade Horária

A. Tarifa Branca

Nesta modalidade o valor da energia varia em três patamares, de acordo com o dia da semana e o horário de utilização, é oferecida aos consumidores do grupo B, com exceção do subgrupo B4 e para as subclasses de Baixa Renda do subgrupo B1 (ANEEL, 2010):

- Ponta, normalmente das 18h às 20h59min, e das 19h às 21h59min no horário de verão;
- Intermediário, refere-se a uma hora anterior e uma hora posterior ao horário de ponta;
- Fora de ponta, demais horas do dia.

O horário de ponta é definido pela distribuidora e aprovado pela ANEEL para toda sua área de concessão, considerando a curva de carga de seu sistema elétrico e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi e feriados definidos por lei federal. Os valores apresentados acima são referentes às duas maiores distribuidoras do Rio Grande do Sul. O valor pago pela utilização da energia nos horários de ponta e intermediário é mais caro que no horário fora de ponta.

B. Tarifa Verde

É aplicada aos consumidores do grupo A (A3a, A4, As), onde é feito um contrato com a concessionária, no qual se define a demanda contratada pelo consumidor.

A fatura de energia para a tarifa verde é composta pela soma das seguintes parcelas:

- Demanda contratada multiplicada pela tarifa de demanda;
- Consumo medido na ponta multiplicado pela tarifa de consumo no horário de ponta;
- Consumo medido fora de ponta multiplicado pela tarifa de consumo no horário fora de ponta;
- Tarifa de ultrapassagem multiplicada pela diferença entre demanda medida e demanda contratada, quando a demanda medida ultrapassa em mais de 5% a demanda contratada.

C. Tarifa Azul

É aplicada aos consumidores do grupo A, sendo obrigatória para os subgrupos A1, A2 e A3 e opcional para os subgrupos A3a, A4 e AS. Da mesma forma que para a tarifa verde é feito um contrato com a concessionária, no qual se define a demanda contratada pelo consumidor, a diferença é que na tarifa azul é contratada uma demanda para o horário de ponta e uma demanda para o horário fora de ponta.

A fatura de energia para a tarifa azul é composta pela soma das seguintes parcelas:

- Demanda contratada no horário de ponta multiplicada pela tarifa de demanda no horário de ponta;
- Demanda contratada no horário fora de ponta multiplicada pela tarifa de demanda no horário fora de ponta;
- Consumo medido na ponta multiplicado pela tarifa de consumo no horário de ponta;
- Consumo medido fora de ponta multiplicado pela tarifa de consumo no horário fora de ponta;
- Tarifa de ultrapassagem multiplicada pela diferença entre demanda medida e demanda contratada, quando a demanda medida ultrapassa em mais de 5% a demanda contratada.

2.3.2 Bandeiras Tarifárias

A partir do ano de 2015, além das modalidades tarifárias, o setor elétrico conta com o Sistema de Bandeiras Tarifárias, que indica se haverá ou não acréscimo no valor da energia a ser repassada ao consumidor final, em função do nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas. O sistema conta com quatro bandeiras, descritas abaixo (ANEEL, 2019).

Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia, sem acréscimos na tarifa;

Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. Acréscimo de R\$ 0,015 na tarifa para cada quilowatt-hora (kWh) consumido;

Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. Acréscimo de R\$ 0,040 na tarifa para cada quilowatt-hora kWh consumido;

Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. Acréscimo de R\$ 0,060 na tarifa para cada quilowatt-hora kWh consumido.

2.4 DINÂMICA DE SISTEMAS

A presente seção tem por objetivo explicar os conceitos fundamentais e as aplicações da técnica de Dinâmica de Sistemas (DS). A principal vantagem desta técnica, é a facilidade em alterar políticas e a possibilidade de testar cenários para as respostas do sistema frente à mudança em qualquer variável do modelo.

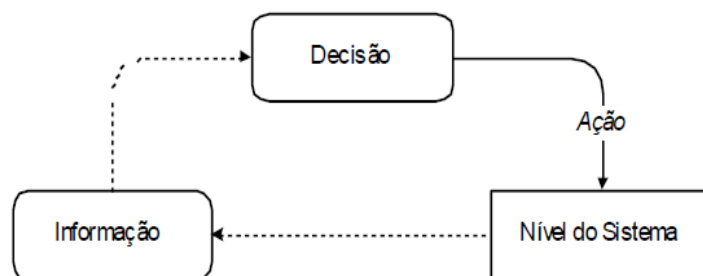
2.4.1 Princípios da Dinâmica de Sistemas

A origem da técnica de Dinâmica de Sistemas está nos conceitos de engenharia de controle e Teoria Geral de Sistemas desenvolvida por Ludwing von Bentalanffy, em 1967. Foi apresentada, também, por Jay W. Forrester que publicou os fundamentos da técnica nos livros *Industrial Dynamics* (1961) e *Principles of Systems* (1968). Trata-se de uma ferramenta que busca analisar o comportamento de sistemas sujeitos a variações ao longo do tempo, sendo que um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos funcionais, componentes e as relações que os integram (BAUMGARTEN, 2016).

Além dos fluxos físicos, que podem ser acumulados, a modelagem em DS permite representar também os fluxos de informação, que são geralmente observados (BORDIN, 2000). A principal característica de DS é a realimentação de informações que gera toda a dinâmica do modelo, nesse processo podem ocorrer fenômenos que interferem no comportamento do sistema durante a simulação. Esses fenômenos podem ser atrasos, distorções e respostas do sistema (ALVES, 1997). A estrutura de um laço de realimentação é apresentada na Figura 7.

Nesse laço as variáveis estão todas conectadas e o nível (nível verdadeiro) do sistema é o gerador de informação (nível aparente), no qual pode conter erros ou ser atrasada, divergindo do nível verdadeiro, sendo que a base do processo decisório é a informação. Nos sistemas reais, os sistemas de realimentação são formados por vários laços de realimentação interconectados, sendo que cada laço é formado por dois tipos de elementos, detalhados nas próximas seções: variáveis de nível e variáveis de taxa. A complexidade de um sistema depende da quantidade de variáveis e das relações não-lineares e dinâmicas entre essas variáveis e das diferentes maneiras que o sistema interage com o ambiente.

Figura 7- Estrutura do laço de realimentação.



Fonte: (BORDIN, 2000).

De acordo com Florentín (2000), os principais pontos a favor dos modelos de Dinâmica de Sistemas são:

- Habilidade de tratar problemas tanto de longo como de curto prazo;
- A simplicidade da modelagem das relações complexas e não-lineares;
- Possibilidade de modelar variáveis sociais;
- Facilidade de testar políticas alternativas e obter os seus efeitos;

- Apresentação dos resultados de forma facilitada.

Como objetivos da DS destaca-se, a determinação dos valores dos elementos presentes no sistema e, principalmente, a especificação do seu comportamento dinâmico (SICA, 2009). Em (FORD, 1999), são sugeridas oito etapas para modelar um sistema em DS, essas etapas são apresentadas abaixo e referenciadas ao longo do trabalho.

1. Aquisição de conhecimento sobre o sistema;
2. Especificação do comportamento dinâmico (modo de referência);
3. Construção do diagrama de estoque e fluxo;
4. Construção do diagrama de laço causal;
5. Estimação dos valores dos parâmetros;
6. Simulação do modelo;
7. Análise de sensibilidade;
8. Aplicação de testes de políticas.

Já (STERMAN, 2000) propõe cinco etapas para elaboração de um modelo em DS, como mostra a Figura 8.

Figura 8- Etapas de modelagem.



Fonte: Adaptado de (STERMAN, 2000).

Para Sterman, o passo mais importante na modelagem é a articulação do problema e definição do horizonte de tempo, delimitar o problema em análise é importante para a simplificação e compreensão da realidade. A partir disso, é desenvolvida uma teoria, chamada de hipótese dinâmica, fornecendo uma explicação da dinâmica que caracteriza o modelo em

termos de realimentação e diagrama de estoque e fluxo do sistema. A terceira etapa é a formalização do modelo especificando, as equações, parâmetros e condições iniciais, essa etapa permite resolver contradições que passam despercebidas na fase conceitual. A etapa de teste deve comparar o comportamento simulado com o comportamento real do sistema, a sensibilidade do modelo deve ser testada em condições extremas a fim de descobrir falhas no modelo proposto. Por fim, é possível a criação de estratégias, estruturas e regras de decisão novas, através da formulação de políticas para avaliar a robustez do modelo.

A DS possui duas estruturas de apresentação de um modelo, na forma de Diagrama de Laço Causal (DLC) e Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF). Esses diagramas permitem analisar o sistema de forma qualitativa e quantitativa. Essas abordagens serão melhor descritas nas seções a seguir.

2.4.2 Diagrama de Laço Causal

Segundo (FORD, 1999), a terceira etapa é a elaboração do Diagrama de Laço Causal (DLC). Os DLCs apresentam as variáveis de um sistema e suas inter-relações, formando os laços de realimentação. Nesta etapa, as variáveis do modelo já são conhecidas, tornando-se necessário definir as relações de causa e efeito entre elas, de forma a reproduzir o comportamento do sistema. Os DLCs, de acordo com (STERMAN, 2000), são excelentes para:

- Capturar rapidamente as hipóteses sobre as causas da dinâmica;
- Explicitar e capturar os modelos mentais de indivíduos ou equipes;
- Comunicar os feedbacks importantes que podem ser responsáveis por um problema.

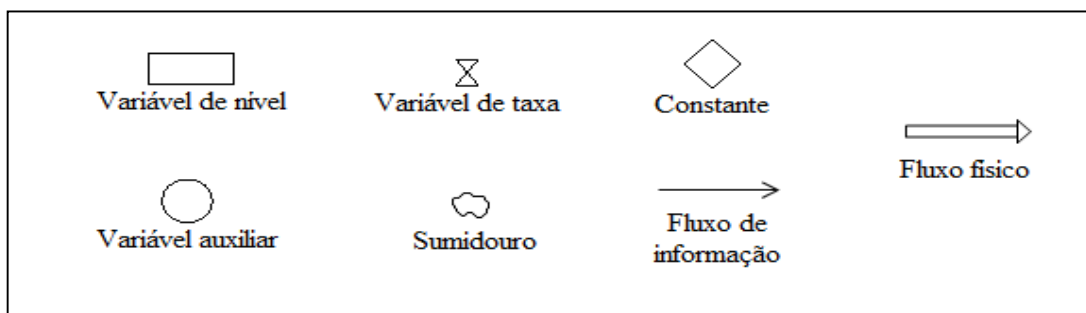
A representação das conexões no DLC é feita através de setas, onde são conectadas uma variável causal e uma variável afetada. Cada seta possui um sinal podendo ser “+” se a alteração é no mesmo sentido ou “-” quando a alteração ocorre em sentido oposto. Quando há um atraso nas informações entre as variáveis são inseridos dois traços em cima do conector. Os laços de realimentação ou *feedbacks* são representados por um círculo no centro do laço, sendo que a polaridade do laço pode ser definida por dois métodos, no primeiro a polaridade é positiva se o número de conectores “-” for par ou zero, caso contrário, à polaridade é dita negativa. No segundo método assume-se que o laço causal está em regime permanente, em seguida altera-se

qualquer variável presente no laço em uma dada direção e observa-se o comportamento das demais variáveis frente a esta mudança.

2.4.3 Diagrama de Estoque e Fluxo

Após a obtenção de conhecimento referente às causas e consequências dos inter-relacionamentos das variáveis através do Diagrama de Laço Causal é elaborado o Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF), onde é possível quantificar essas relações a partir de equações matemáticas. Os símbolos dos elementos utilizados para elaboração do DEF são apresentados na Figura 9.

Figura 9- Simbologia utilizada no Diagrama de Estoque e Fluxo.



Fonte: Autoria própria.

- Variáveis de nível: também denominadas de estoques, representam acumulações (integrações), se o fluxo é contínuo, ou somatórias se o fluxo é discreto. Essas variáveis são influenciadas pelas ações do sistema, ou seja, a cada etapa da simulação há adição de um fluxo de entrada e subtração de um fluxo de saída, isso significa que essas variáveis possuem memória.
- Variáveis de taxa: controlam um fluxo, ou seja, controlam a taxa com que as variáveis de nível variam. Podem ser compostas por variáveis de nível, auxiliares ou constantes.
- Constante: é um valor que permanece inalterado ao longo da simulação.
- Variáveis auxiliares: representam uma operação algébrica com qualquer combinação de variáveis de estoque, taxa e constantes. Apresentam resultados de cada instante da simulação, isto é, não guardam informações ao longo da simulação.

- Sumidouro ou fonte: representam os limites do modelo, são utilizados quando a origem (fonte) e/ou destino (sumidouro) de um fluxo físico não influencia o sistema.
- Fluxo de informação: são fluxos não conservativos, auxiliam na tomada de decisão.
- Fluxo físico: representam a ideia de quantidades sendo transferidas entre pontos do sistema, esses fluxos são conservativos, ou seja, a quantidade transferida de um nível é a mesma recebida em outro.

3 ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta uma revisão do estado da arte acerca da metodologia proposta, a fim de comprovar a originalidade desta Tese. O capítulo contempla: a gestão de recursos energéticos e gerenciamento de carga; o despacho de energia em microrredes; e a integração de recursos energéticos com Dinâmica de Sistemas.

3.1 GESTÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS E GERENCIAMENTO DE CARGA EM MICRORREDES

O novo modelo energético mundial exige que o planejamento e operação dos sistemas sejam adaptados às novas necessidades. Os recursos energéticos combinados com o gerenciamento de demanda em um sistema podem fornecer resultados interessantes do ponto de vista econômico e de qualidade de energia, contudo para obter o êxito dessa integração é imprescindível que se tenham ferramentas que auxiliem nesse planejamento.

A operação de uma microrrede depende da integração bem sucedida entre os elementos do sistema, ou seja, para atingir uma alta eficiência os recursos precisam ser bem gerenciados. Nesse sentido, (JIANG; FEI, 2015) propõe uma microrrede inteligente com boa relação custo-benefício, baseada em agentes hierárquicos inteligentes com gerenciamento dinâmico de resposta à demanda e gerenciamento de recursos energéticos distribuídos. Nesse trabalho é proposta uma metodologia que considera o gerenciamento de demanda por parte da concessionária, ou seja, as decisões de demanda são tomadas pela concessionária com adaptações feitas pelo usuário. Já na presente tese, o gerenciamento de demanda é feito pelo consumidor com base nas cargas e fontes de geração disponíveis.

Embora a análise de aspectos técnicos e econômicos de forma isolada seja de grande importância, o predomínio de trabalhos encontrados na literatura são aplicados ao Planejamento Integrado de Recursos – PIR, no qual é uma ferramenta que visa auxiliar no processo de tomada de decisão acerca do melhor aproveitamento dos recursos, visando não somente aspectos econômicos, como, sociais, ambientais, técnicos e políticos.

Nesse sentido o artigo apresentado por (KHODAEI; BAHRAMIRAD; SHAHIDEHPOUR, 2015) retrata um modelo para o planejamento de microrredes que investiga a viabilidade econômica e a melhor combinação de recursos de geração frente a incertezas, o

estudo utiliza um modelo de otimização robusto para tratar as incertezas. A metodologia proposta na presente tese também fornece a viabilidade econômica e a quantidade de geração necessária de cada fonte, contudo é possível inserir novas variáveis e alterar as existentes de forma simplificada.

Um modelo de Planejamento de Recursos Integrados que implementa um algoritmo com gerenciamento de demanda é exposto em (ZHU et al., 2015), sendo que esse modelo é baseado no Controle de Carga Direta, nele, é possível realizar o deslocamento de carga e corte de pico para reduzir investimentos e minimizar custos. Assim como no modelo desenvolvido na presente tese, o foco deste trabalho é realizar o gerenciamento de carga para obter o impacto econômico no sistema. O diferencial dos dois trabalhos é que na metodologia apresentada por (ZHU et al., 2015) o gerenciamento visa o deslocamento de carga, enquanto que no modelo proposto o gerenciamento é realizado pela redução da curva de demanda contratada, através da geração distribuída.

A priorização de recursos energéticos pelo lado da oferta utilizando análise por envoltória de dados, técnica essa que utiliza programação matemática, é apresentada em (UDAETA et al., 2016). Nesse trabalho há uma hierarquização das fontes ambientais, políticas, sociais, técnicas e econômicas, por meio de indicadores numéricos e linguísticos obtidos por meio de participação pública. Essa ferramenta multicritério pode auxiliar na seleção do recurso energético mais eficiente no Planejamento Integrado de Recursos energéticos, ou seja, nesse trabalho é utilizada a abordagem *top down* pois formula uma visão geral do sistema, considerando diversos aspectos. Esses aspectos são tratados de forma abrangente, o que difere do modelo desenvolvido na presente tese que aborda somente um aspecto de forma detalhada.

Em (BERNAL, 2018), uma metodologia de integração de recursos energéticos aplicada ao modelo do PIR é desenvolvida, para isso é considerado o Mapeamento Energo-ambiental para a integração de recursos. O estudo de caso é aplicado na região de Araçatuba e é possível obter análises ambientais, políticas, sociais e técnico-econômicas. Entretanto, além de utilizar a abordagem *top down*, os resultados obtidos são em geral qualitativos. Já no modelo proposto é possível obter resultados quantitativos, que expressam o montante real economizado com a integração dos recursos.

Considerando o gerenciamento de demanda com base nas tarifas, o trabalho apresentado em (SILVA, 2017) expõe algumas contribuições, como, proposição de um modelo de resposta da demanda com cargas determinadas a priori, utilizando uma abordagem trade-off entre os

preços da eletricidade em tempo real e o princípio da mínima volatilidades das tarifas, além da análise das incertezas comerciais entre a concessionária e as microrredes e um estudo sobre a estocasticidade da previsão de geração local em regiões tropicais. No modelo desenvolvido em DS as variáveis externas, como variação nas tarifas e incertezas comerciais não são consideradas, o foco está relacionado com variáveis internas a microrrede, como a variação na disponibilidade de energia e crescimento ou redução da demanda.

O modelo proposto pela presente tese está delimitado pelo gerenciamento energético de uma microrrede e não engloba aspectos de fluxo de potência em rede. Na literatura existe uma ampla parcela de trabalhos que abordam os aspectos técnicos de conexão das microrredes. Dentre estes trabalhos está (GRISALES et al., 2018), onde é apresentada uma metodologia para planejamento e operação de sistemas de distribuição no contexto das redes inteligentes, nesse trabalho são consideradas como variáveis de decisão geração distribuída, armazenadores e elementos de proteção. Sendo que o foco é a integração desses recursos para permitir uma maior automação dos sistemas. Ainda nesse contexto, está o trabalho apresentado por (DEGEILH; GROSS, 2015) que retrata um problema de otimização, elaborado para determinar o cronograma operacional dos recursos de armazenamento controláveis, em coordenação com a demanda e os recursos convencionais e renováveis, com essa metodologia é possível quantificar os efeitos variáveis de economia, emissões e confiabilidade do sistema. Essas metodologias apresentadas servem como complemento ao trabalho desenvolvido na presente tese.

3.2 DESPACHO DE ENERGIA EM MICRORREDES

Manter o balanço energético entre geração e demanda ou o suprimento pleno de demanda elétrica com toda sua variabilidade é essencial para qualquer sistema de energia elétrica, com isso determinar o quanto cada gerador precisa fornecer para atender a carga, envolve diversas variáveis. Além dos aspectos técnicos, que devem ser respeitados na operação de um sistema, como, níveis de tensão e reativos, os fatores financeiros também devem ser considerados visando minimizar o custo total de operação. Assim, determinar o ponto de operação de cada gerador tendo em vista o despacho econômico de energia nas microrredes é um problema essencial e diário.

O despacho em microrredes é considerado como a extensão e aplicação dos métodos de controle. Tendo em vista a incerteza das condições ambientais e as flutuações da demanda, a

operação econômica é geralmente considerada como um problema de otimização, dessa forma são utilizados métodos analíticos centralizados, como, métodos de busca de gradiente e algoritmos genéticos. Contudo, nesse caso é necessário um controlador central para coletar informações de todo sistema tornando a velocidade de resposta mais lenta devido a grande quantidade de dados que precisam ser coletados, dessa forma tem-se utilizado métodos distribuídos baseados em sistemas multiagentes dispensando a utilização do controlador central, pois a solução ótima é obtida iterativamente pela troca de informações entre vizinhos (XIA et al., 2018).

O despacho econômico pode ser estático (DEE) no qual a demanda é considerada para um período específico de operação e os limites da taxa de rampa dos geradores não são considerados. Ou pode ser dinâmico (DED) com uma potência variável para um período de operação e capacidade de antecipação para que o sistema possa antecipar suas alterações na demanda em um futuro próximo (XIA; ELAIW, 2010). Apesar de não considerar a taxa de rampa dos geradores, o modelo proposto utiliza o despacho dinâmico tendo em vista que a carga é variável a cada instante de tempo.

O despacho na presente tese é feito com base na curva de demanda, visando sempre a melhor configuração de geração para obtenção de um impacto econômico positivo. Nesse sentido em (GUO; WEN; MAO, 2016) a operação econômica é feita utilizando um modelo determinístico, baseado em um algoritmo de consenso de média de tempo finito e gradiente projetado, onde o custo de superestimação e subestimação da energia eólica é proposto, nesse sistema são considerados geradores térmicos convencionais, geradores eólicos integrados com armazenadores e cargas. Nesse trabalho o despacho é realizado com base em grandes sistemas de potência, com mais de uma barra. Já o modelo apresentado é desenvolvido para sistemas menores, onde existe apenas um barramento que conecta todos os recursos do sistema, isto é, o despacho é realizado dentro de uma microrrede.

Em (CERQUEIRA; SAAVEDRA, 2015) o algoritmo *Pattern search* é utilizado como ferramenta para a operação econômica/ambiental de uma microrrede composta por fontes renováveis, geradores diesel, microturbinas e baterias. Esse algoritmo examina um conjunto de pontos ao redor de um ponto atual, isto é, se a função objetivo do ponto for menor que a função do ponto atual, esse será utilizado na próxima iteração. Da mesma forma que na metodologia proposta em DS, as fontes renováveis têm prioridade no despacho, pois contribuem no aspecto ambiental, não possuem custos de operação e não são despacháveis. Em seguida, são

despachadas em ordem de prioridade as baterias, os geradores diesel/microturbinas e a rede principal. O modelo desenvolvido em DS não considera o impacto ambiental, entretanto, realiza a modelagem detalhada de cada fonte de geração, dessa forma é possível observar o impacto no sistema de cada recurso despachado. Além disso, como principal contribuição, realiza a expansão do sistema com base na economia obtida a partir da implementação da microrrede.

Baseado em políticas de mercado (HATZIARGYRIOU et al., 2009) apresenta um estudo que descreve a operação de uma microrrede centralizada sob várias combinações de preços de mercado, isto é, a cada quinze minutos é feita uma estimativa de geração de cada recurso para a próxima hora, baseados nos preços de mercado aberto, nas cargas previstas e nos custos operacionais dos recursos. A partir da otimização dessa operação o controlador central envia sinais de despacho para controladores locais.

Apesar de realizar o despacho de energia em uma microrrede, o trabalho apresentado por (HATZIARGYRIOU et al., 2009) não considera a expansão das fontes de geração, enquanto que no modelo apresentado a expansão é uma das variáveis cruciais, considerando a autossuficiência energética da microrrede. Outro fator que diferencia ambos trabalhos, é o despacho em tempo real, embora o modelo em DS não apresente esta característica, com base na inserção dos dados de demanda previstos para uma determinada série temporal é possível prever o comportamento do sistema.

O problema de despacho econômico também é discutido em (HETZER; YU; BHATTARAI, 2008), onde são incluídos geradores clássicos e eólicos na simulação numérica. A simulação é realizada no MATLAB e para caracterizar a variável aleatória de velocidade do vento é introduzida a função de densidade de probabilidade de Weibull, além disso, são incluídos fatores para explicar a superestimação e a subestimação da energia eólica. Neste trabalho além de considerar os aspectos técnicos, a microrrede é considerada ilhada, desta forma as variáveis externas como preço de energia não interferem no despacho de geradores, o que diferencia do modelo apresentado, onde a microrrede está conectada na rede da concessionária e o gerenciamento de recursos é baseado no preço de despacho e também nas necessidades energéticas do sistema.

3.3 APLICAÇÕES DA DINÂMICA DE SISTEMAS NO SETOR ELÉTRICO

A técnica de Dinâmica de Sistemas é aplicada nas mais diversas áreas, no setor elétrico, tem sido utilizada como ferramenta de análise, planejamento e alocação de recursos. Essa variedade de aplicações é devido à característica principal da técnica que é a realimentação. Em (SAAVEDRA M.; CRISTIANO; FRANCISCO, 2018), é possível analisar uma revisão relacionada aos trabalhos mais recentes desenvolvidos na área de fornecimento de energia renovável utilizando a DS como ferramenta de modelagem.

A fim de avaliar as políticas de promoção da energia fotovoltaica o trabalho descrito em (HSU, 2012), apresenta uma modelagem em DS para analisar o custo/benefício para diferentes combinações de políticas de promoção, metas de redução de emissões de CO₂ e limitações orçamentárias. A política para promover a instalação de sistemas fotovoltaicos considerada nesse estudo foi o incentivo ao público, assim o fator chave é aumentar o número de instalações de sistemas fotovoltaicos, aumentando assim a produção dos fabricantes e conseqüentemente reduzindo os custos dos sistemas. Os custos de instalação incluem, além do custo do sistema, custos de manutenção e juros sobre empréstimos bancários para aquisição de equipamentos.

A influência da política de tarifas de transmissão e distribuição sobre o fluxo de caixa do empreendimento da rede elétrica é abordado em (HE et al., 2018), nesse estudo um modelo de tomada de decisão de otimização de investimentos é aplicado a um estudo de caso, para auxiliar o processo de decisão de investimento da empresa de energia elétrica.

A implantação de novas tecnologias, como é o caso dos medidores inteligentes, também pode utilizar a DS para a modelagem, como utilizado em (DEHDARIAN, 2017), em que a dinâmica de interação entre diferentes agentes no processo de implantação da tecnologia da medição inteligente é examinada, além disso, propõe cenários para recuperação eficiente dos custos.

Em (ASLANI; HELO; NAARANOJA, 2014), é apresentado um modelo que discute o papel da diversificação dos recursos na segurança do suprimento energético na Finlândia. Nesse estudo, são feitas análises qualitativa e quantitativa para avaliar cenários de políticas de recursos renováveis, como pacotes de incentivos, dependência e demanda de energia.

O trabalho descrito por Liu et al. (2015) aborda o compromisso da China com a redução das emissões de CO₂. Através da Dinâmica de Sistemas prevê o consumo de energia, as emissões brutas de CO₂ e a intensidade das emissões de 2013 a 2020. O modelo inclui os recursos energéticos tradicionais, como, carvão, petróleo e gás, e os recursos renováveis, como,

usinas hidrelétricas, nucleares e eólicas. O crescimento econômico também é levado em consideração na análise do consumo de energia e conseqüentemente nas emissões.

No Brasil, a Dinâmica de Sistemas também vem sendo muito utilizada para tratar questões relacionadas ao setor elétrico, como em (SANTOS, 2018), onde é proposta uma metodologia para a projeção de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de baixa tensão, levando em conta aspectos decisivos na instalação de sistemas fotovoltaicos por parte dos consumidores, como, econômicos, de gestão, políticos, sociais e técnicos.

A análise econômico-financeira da substituição de energia elétrica por gás natural, para o aquecimento de água em instalações prediais residenciais é realizada por (ORTEGOSA, 2006). Nesse trabalho a técnica de DS é proposta como metodologia para a análise de viabilidade da utilização do gás natural para aquecimento, ao resultados demonstraram que a viabilidade é dependente dos ajustes tarifários e da variação na taxa mínima de atratividade. A análise da inserção de pequenas fontes fotovoltaicas no sistema de distribuição é feita por Baumgarten (2016), o modelo avalia a tomada de decisão dos consumidores quanto ao investimento em fontes de micro geração fotovoltaica englobando não apenas fatores técnicos e econômicos, mas também fatores sociais e ambientais, fornece também, uma projeção do potencial de energia fotovoltaica associada à micro e minigeração, e permite verificar a ação da “*death spiral*” (espiral da morte) sobre o faturamento de distribuidoras.

As políticas do mercado de carbono também são avaliadas a partir da DS em (SANCHES, 2013). Nesse trabalho é analisada a demanda de créditos de carbono pela Europa para o período de 2013 a 2020 e a contribuição do Brasil para a compensação das emissões excedentes de Gases do efeito estufa (GEE), sendo que a hipótese dinâmica sugere um equilíbrio entre as emissões de GEE na Europa e os créditos de carbono provenientes de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram retratados diversos trabalhos que colaboraram para o desenvolvimento desta Tese. Há diversas referências sobre recursos energéticos, integração desses recursos e gerenciamento de carga, contudo, não há metodologias que consigam aplicar em concomitante todos esses conceitos e obter as vantagens financeiras dessa aplicação, e é neste ponto que a presente tese tem seu destaque.

Grande parte dos trabalhos encontrados sobre integração de recursos são aplicados ao PIR, desta forma apresentam uma visão global do sistema, considerando que englobam aspectos econômicos, técnicos, sociais, políticos e ambientais. Já o modelo desenvolvido por DS, apesar de englobar apenas os aspectos econômicos, apresenta uma visão detalhada do impacto financeiro da integração de recursos em uma microrrede. Os recursos são considerados com todas as particularidades que interferem no despacho econômico.

Outro diferencial do modelo proposto é que integra o despacho econômico com o gerenciamento de demanda. Dessa forma é possível planejar o gerenciamento dos recursos e também a expansão do sistema, de acordo com o somatório da economia obtida pela redução da contratação de energia da concessionária.

No sentido de fornecer uma ferramenta integralizada que consiga atender a todos os parâmetros citados, como gerenciamento de demanda e de recursos, expansão do sistema de geração e análise financeira considerando critérios tarifários e de insumos energéticos, na sequência será descrito em detalhes o modelo desenvolvido em DS.

4 MODELAGEM CONCEITUAL E MATEMÁTICA DO MODELO

O presente capítulo tem por objetivo a apresentação do modelo desenvolvido em Dinâmica de Sistemas. Inicialmente será apresentada a ideia geral de desenvolvimento do modelo e o Diagrama de Laço Causal. Após esta etapa, onde as principais variáveis do modelo já são conhecidas, será apresentada a modelagem matemática que permite a análise quantitativa a partir de simulações.

4.1 MODELO CONCEITUAL PROPOSTO

O objetivo do modelo proposto é analisar a viabilidade econômica da integração de recursos energéticos, formando uma microrrede, visando o gerenciamento de demanda e consequentemente a redução nos custos com energia elétrica. A Figura 10 apresenta a ideia central da proposta, na qual inicialmente são escolhidos os recursos energéticos que podem ser intermitentes, como solar e eólica, ou com despacho controlado. Além disso, é possível analisar a necessidade da inserção de armazenadores. O resultado da inserção dos recursos é aplicado diretamente na demanda de energia, o que fornece um montante de economia no sistema.

Figura 10- Ideia geral do modelo proposto.

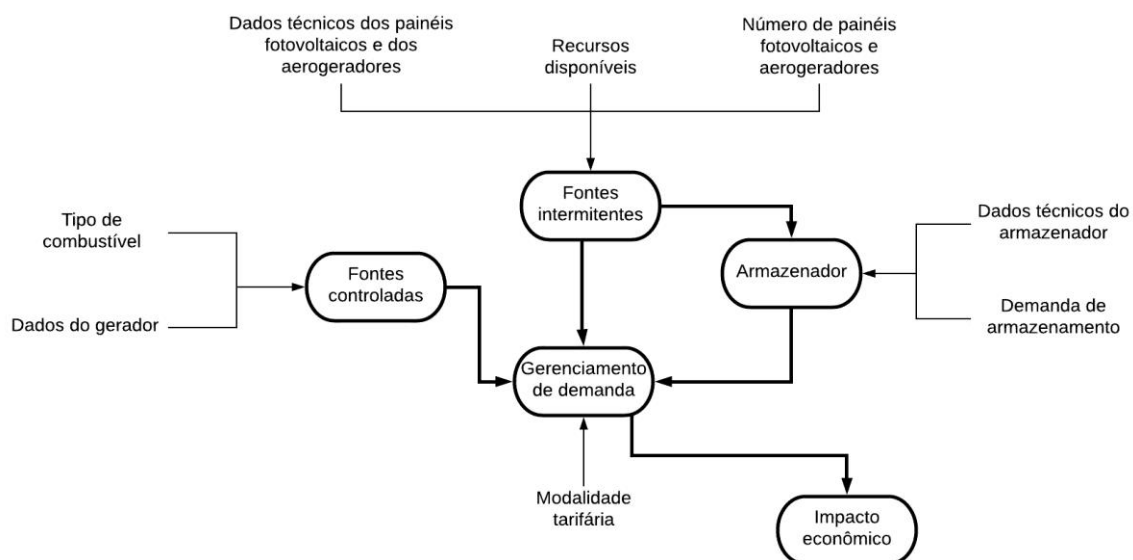


Fonte: Autoria própria.

A instalação de GD envolve planejamento, análise e implementação do sistema, sendo necessária uma avaliação criteriosa que leve em consideração o tipo de fonte geradora, a potência a ser instalada, a localização, o sistema tarifário da unidade consumidora e a viabilidade econômica do projeto. Essa modelagem considera todos esses aspectos e é desenvolvida para aplicação de qualquer tipo de fonte de geração, além da possibilidade de ser aplicada em diversos setores, como, por exemplo, Residencial, Comercial, Industrial, Rural e Serviço Público.

A Figura 11 apresenta a estrutura do modelo proposto, que engloba todos os recursos disponíveis no local em análise, como fontes de geração que podem ser controladas, fontes intermitentes e armazenadores de energia. Então, a partir desses recursos, realiza o planejamento do gerenciamento de demanda, bem como o estudo da viabilidade econômica do projeto. A partir da Figura 11, é possível observar as variáveis de entrada de cada módulo.

Figura 11- Estrutura geral do modelo proposto.



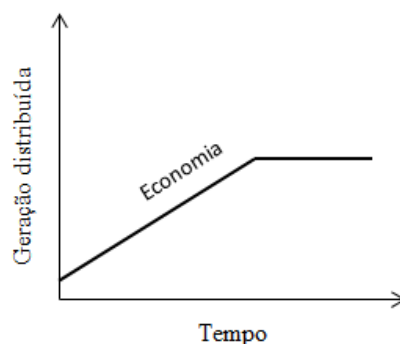
Fonte: Autoria própria.

Na primeira etapa, de acordo com (FORD, 1999), é necessário adquirir conhecimento e apresentar as principais variáveis do sistema, assim, nos capítulos 2 e 3, foi apresentada uma

revisão acerca da integração de recursos energéticos, envolvendo geração distribuída, microrredes, sistema tarifário brasileiro e gerenciamento de demanda.

A segunda etapa da modelagem em DS é a especificação do comportamento dinâmico do sistema, onde é avaliado se o sistema possui um comportamento dinâmico, se a avaliação for positiva, é elaborado um gráfico da variável dinâmica do modelo, denominado modo de referência. O modo de referência para o modelo proposto é apresentado na Figura 12.

Figura 12- Modo de referência.



Fonte: Autoria própria.

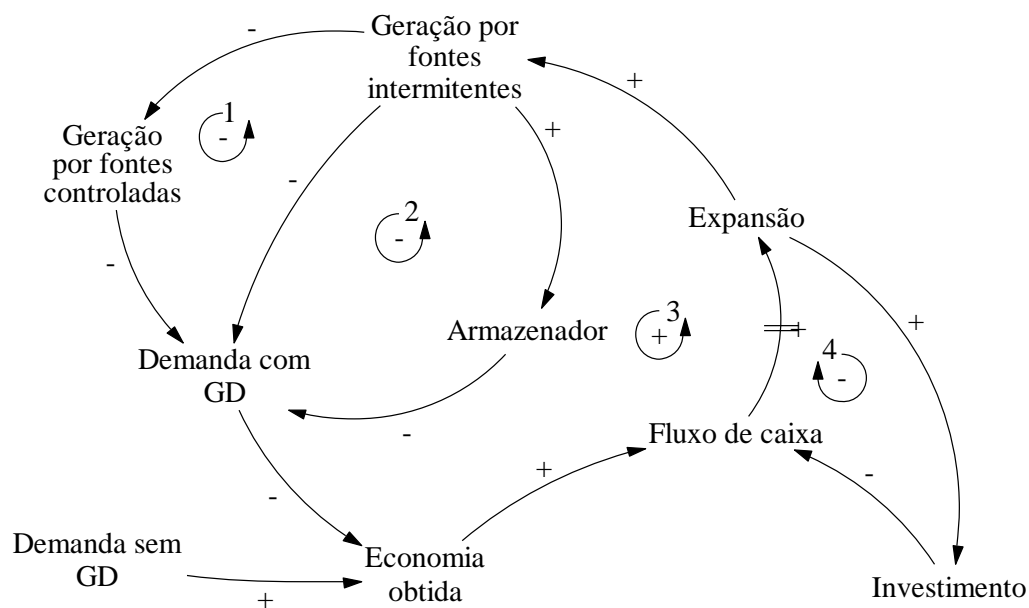
No decorrer do tempo, com a expansão do sistema e aumento da participação da geração distribuída, a economia obtida cresce, até que em um determinado momento, o sistema atinge a autossuficiência energética e a economia é estabilizada no seu valor máximo.

4.1.1 Diagrama de Laço Causal proposto

O modelo proposto é desenvolvido com auxílio do software Vensim® PLE versão 6.3, da Ventana Systems. A Ventana Systems foi criada em 1985 em Harvard, nessa época, desenvolvia modelos de simulação em larga escala, que integravam elementos comerciais e técnicos para resolver problemas complexos. Para diminuir o tempo de desenvolvimento dos modelos, criou sua própria linguagem de programação chamada Vensim. O modelo foi sendo aprimorado até se tornar o software Vensim®, que permite a simulação de sistemas reais e é utilizado para desenvolver e analisar modelos com feedback. Com ele foi possível desenvolver tanto o DLC, quanto o DEF do modelo elaborado.

O DLC simplificado elaborado para o problema em análise é apresentado na Figura 13, nesse diagrama são apresentadas as variáveis envolvidas na modelagem econômica dos recursos energéticos e as relações entre elas.

Figura 13- Diagrama de Laço Causal geral do modelo proposto.



Fonte: Autoria própria.

A partir da geração de energia, proveniente das fontes intermitentes e fontes controladas, juntamente com a energia fornecida pelos armazenadores, no caso as baterias, é possível obter a demanda com a inserção da GD, sendo que quanto maior essa demanda menor será a economia obtida. Outro fator considerado para a demanda com DG é o Net Metering realizado com a rede, no qual a demanda gerada em excesso em um mês é entregue a rede e posteriormente, quando a GD não consegue suprir a demanda, essa energia é utilizada. A economia é alcançada com a diferença entre o valor da fatura com GD e o valor da fatura sem GD, visto que a composição da fatura de energia depende do tipo de tarifa adotada pelo local em estudo. Com isso, é possível obter o fluxo de caixa, dado pela diferença entre as entradas, representada pela economia, e as saídas, fornecidas pelos investimentos. Quanto maior a economia, maior o fluxo de caixa e quanto maior os investimentos, menor o fluxo de caixa. Com base no fluxo de caixa

positivo é realizada a expansão do sistema, que pode ser tanto em geração quanto em armazenamento.

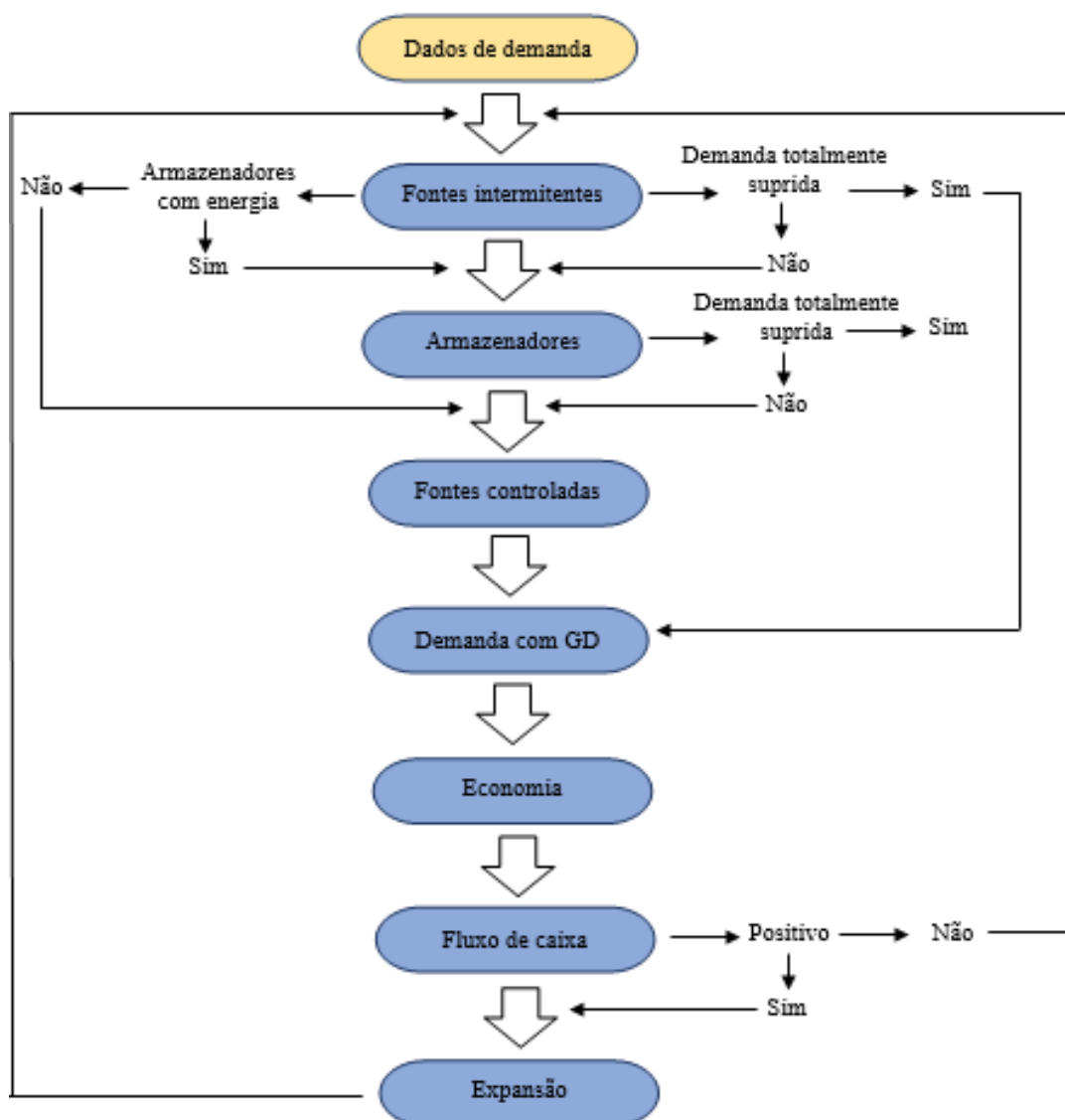
A geração de energia vai depender da disponibilidade de insumos energéticos, que está vinculada a quantidade de combustível disponível, e da disponibilidade dos recursos renováveis como irradiação solar e vento. Os laços de realimentação do DLC proposto são descritos a seguir.

- Laço 1: Relaciona a geração por fontes intermitentes e controladas, quanto maior for a economia obtida, maior será o fluxo de caixa positivo e maior poderá ser a expansão do sistema. Quanto mais elevada a geração por fontes intermitentes, menor será a geração por fontes controladas.
- Laço 2: Representa a influência da geração por fontes intermitentes na demanda com GD e, conseqüentemente na economia obtida.
- Laço 3: A energia armazenada só é utilizada quando a geração a partir dos recursos renováveis não supre a necessidade de demanda. Portanto, o carregamento é modelado de acordo com o excesso de geração a partir das fontes intermitentes. Quando a soma da energia armazenada com a produzida pelas fontes intermitentes é inferior a necessária, os geradores com despacho controlado entram no sistema.
- Laço 4: Neste laço quanto maior o investimento, que engloba módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas, inversores, insumos energéticos e armazenadores, menor é o fluxo de caixa, ou seja, o fluxo de caixa tende a ser negativo. Se o fluxo de caixa é positivo o sistema pode ser expandido, contudo, há um atraso entre o fluxo de caixa e a expansão, tendo em vista o tempo necessário para o acúmulo do montante necessário para a expansão.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

A simulação em DS é baseada em equações, essas equações são as instruções que indicam a solução do problema passo a passo (SILVEIRA, 1997). A modelagem matemática elaborada permite uma evolução sob as limitações do cálculo tradicional, permitindo a realização de testes e aplicação de políticas por meio da alteração das variáveis do modelo. Na Figura 14 é apresentada a sequência cronológica global das etapas do modelo.

Figura 14- Estrutura global do modelo computacional.



Fonte: Autoria própria.

A primeira etapa é a definição do tipo de consumidor, na presente tese são os consumidores do grupo A, com modalidade tarifária azul, assim, há um valor de demanda contratada para o período em ponta e fora ponta. Desse modo, são inseridos os dados de demanda, e então a geração por fontes intermitentes é abatida da demanda faturada.

Com base na demanda faturada e no contrato de energia é feita uma análise do total de demanda excedente, se essa demanda é igual a zero o sistema fornece o valor da demanda com GD. Caso essa demanda seja maior que zero e os armazenadores estiverem carregados, os armazenadores fornecem energia ao sistema. Então, é feita uma nova análise com relação ao suprimento de energia, se ainda houver excesso, entram as fontes controladas. A partir disso, é obtido o valor de demanda com GD e a economia alcançada.

Por fim, o fluxo de caixa do sistema é obtido, sendo que, se o fluxo for positivo, é estipulado um tempo para acúmulo do montante suficiente para a expansão do sistema. A partir dessa expansão é iniciada uma nova iteração.

4.2.1 Diagrama de Estoque e Fluxo proposto

O desenvolvimento do DEF para o modelo proposto é baseado na estrutura da Figura 13, atendendo a sequência de passos apresentada na Figura 10, esta representa a quarta etapa de acordo com (FORD, 1999). Para uma melhor compreensão, o DEF é apresentado em módulos.

4.2.1.1 Módulo fontes intermitentes

No módulo de fontes intermitentes são equacionadas as variáveis que representam a energia produzida a partir dos recursos renováveis, neste caso, os recursos utilizados são as energias fotovoltaica e eólica. A energia fotovoltaica é modelada segundo (TOWNSEND, 1989).

O cálculo da energia fotovoltaica depende dos valores de temperatura e irradiação total, bem como dos dados de entrada que variam de acordo com as especificações técnicas de cada módulo, enquanto que a geração eólica leva em consideração a velocidade do vento e a curva de potência do aerogerador. As variáveis utilizadas no submodelo das fontes intermitentes são descritas na Tabela 3.

Tabela 3- Variável do módulo fontes intermitentes.

| Variável | Unidade | Descrição |
|-----------------------|------------------|---|
| V_{max}^* | V | Tensão de referência no ponto de máxima potência |
| V_{ca}^* | V | Tensão de referência em vazio |
| I_{cc}^* | A | Corrente de curto circuito de referência |
| I_o^* | A | Corrente inversa máxima de referência de saturação do díodo |
| V_t^* | Adimensional | Potencial térmico de referência |
| I_{max}^* | A | Corrente de referência no ponto de máxima potência |
| T^* | °K | Temperatura de referência |
| G^* | W/m ² | Irradiação de referência |
| N_{sm} | Células | Número de células ligadas em série |
| $NOCT$ | °C | <i>Nominal Operating Cell Temperature @ Irradiação igual a 800 W/m²</i> Temperatura ambiente de 20 °C |
| m' | Adimensional | Fator de idealidade equivalente |
| m | Adimensional | Fator de idealidade do díodo |
| <i>Área do módulo</i> | m ² | Área ocupada pelo módulo fotovoltaico |
| V_{max} | V | Tensão no ponto de máxima potência |
| I_{max} | A | Corrente no ponto de máxima potência |
| P_{max} | W | Potência máxima |
| G | W/m ² | Irradiação incidente |
| T_a | °C | Temperatura ambiente |
| T_c | °K | Temperatura da célula |
| P_{ca} | W | Potência de saída |
| $\eta_{inversor}$ | Adimensional | Rendimento do inversor |
| V | m/s | Velocidade do vento |

Fonte: Autoria própria.

O DEF desenvolvido para este módulo é apresentado na Figura 15. Para o cálculo da energia fotovoltaica inicialmente é calculada a tensão e a corrente no ponto de máxima potência, de acordo com as Equações (1) e (2). A tensão máxima é determinada a partir das correntes de curto-circuito e máxima em função da irradiação e da variação da corrente inversa de saturação com a temperatura.

$$V_{max} = m \times V_t \times \ln \left[\frac{\frac{G}{G^*} \times (I_{cc}^* - I_{max}^*)}{I_o^* \times \left(\frac{T_c}{T^*}\right)^3 \times e^{\frac{\varepsilon}{m'} \times \left(\frac{1}{V_t^*} - \frac{1}{V_t}\right)}} \right] \quad (1)$$

Sendo que I_o^* varia com a tensão de circuito aberto, de acordo com a expressão:

$$I_o^* = \frac{I_{cc}^*}{e^{\left(\frac{V_{ca}^*}{m' \times V_t^*} - 1\right)}} \quad (2)$$

A temperatura da célula é dada em Kelvin e varia de acordo com a temperatura ambiente e a irradiação solar.

$$T_c = T_a + \left(\frac{G \times (NOCT - 20)}{800} \right) \quad (4)$$

A partir da equação (5) é possível calcular o fator de idealidade do diodo em função dos parâmetros característicos da célula fotovoltaica.

$$m = \frac{V_{max}^* - V_{ca}^*}{V_t^* \times \ln \left(1 + \frac{I_{max}^*}{I_{cc}^*} \right)} \quad (5)$$

Sendo que o valor de m' , fator de idealidade equivalente, é o fator de idealidade dividido pelo número de células ligadas em série. A corrente máxima depende fundamentalmente da irradiação, conforme a equação (6).

$$I_{max} = \frac{G}{G^*} I_{max}^* \quad (6)$$

Logo, a potência máxima obtida para as condições de temperatura e irradiação é dada pela equação (7).

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (7)$$

Para obter a potência fornecida pelo sistema, P_{ca} , é necessário multiplicar o valor obtido em (7) pelo número de módulos, sendo que essa variável possui um valor inicial e é incrementada na expansão do sistema. O número de módulos é calculado considerando o número de *strings* de cada inversor, isto é, o número de módulos e de inversores são calculados um em função do outro. A área total requerida é o número de módulos multiplicado pela área de cada unidade. Nesse cálculo não é considerado o afastamento entre as *strings*, devido ao fato de que é necessário conhecer o local de instalação dos painéis para conhecer a distância de afastamento.

A energia eólica gerada é baseada na curva de potência do aerogerador pelo número de aerogeradores. O número de aerogeradores é sofre um incremento de acordo com a expansão

do sistema. Com base nas gerações eólica e fotovoltaica é possível obter o total de energia alcançada por meio das fontes intermitentes.

4.2.1.2 Módulo fontes controladas

Nesse módulo entram as fontes de geração que possuem o despacho controlado, podendo ser geradores a biocombustíveis, diesel, gás natural, biogás e biomassa, dependendo da disponibilidade do insumo energético do local de análise. A descrição das variáveis desse módulo é apresentada na Tabela 4, e na Figura 16 é apresentado o DEF para esses recursos.

Tabela 4- Variáveis do módulo fontes controladas.

| Variável | Unidade | Descrição |
|-----------------|----------------|--------------------------|
| <i>DG</i> | W | Despacho do gerador |
| <i>PG</i> | W | Potência do gerador |
| <i>CG</i> | W | Consumo do gerador |
| <i>MPD</i> | litros ou kg | Matéria-prima disponível |
| <i>MPI</i> | litros ou kg | Matéria-prima inicial |
| <i>MPC</i> | litros ou kg | Matéria-prima consumida |
| <i>IE</i> | litros ou kg | Insumos energéticos |
| <i>C</i> | litros ou kg | Combustível |

Fonte: Autoria própria.

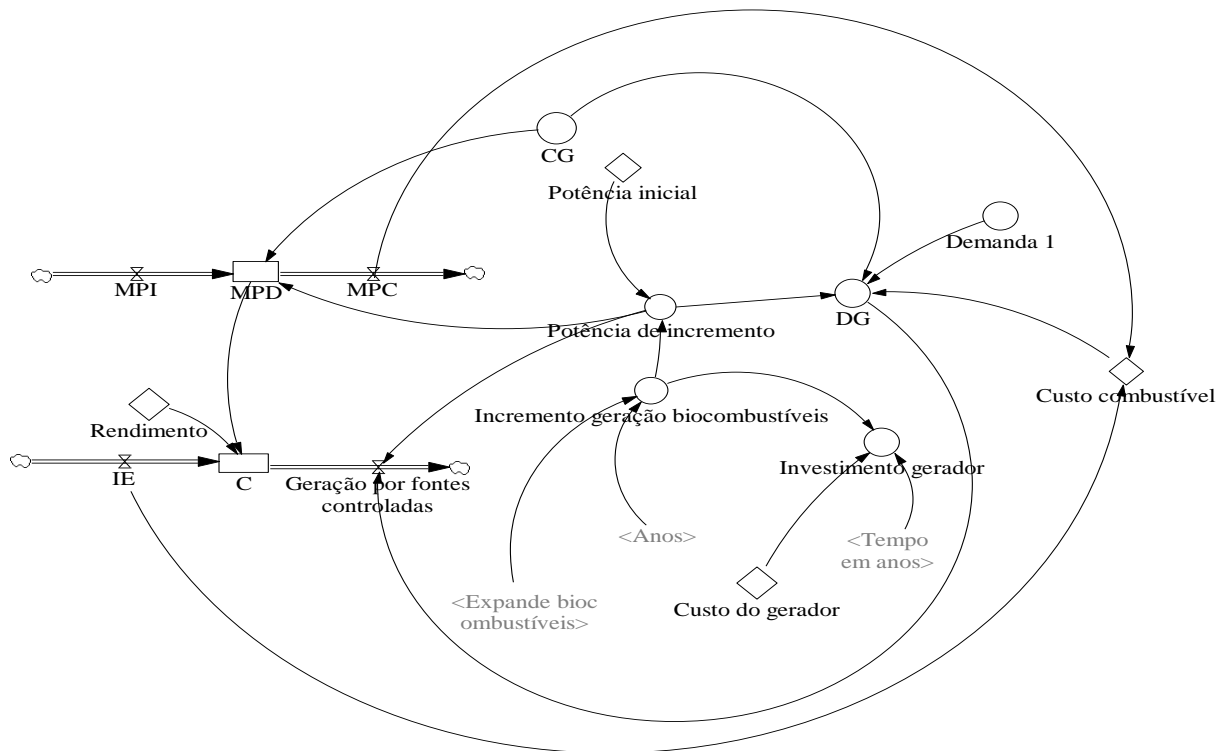
A partir do diagrama é possível observar que existem duas variáveis de nível representando os estoques ou armazenadores no sistema. A primeira variável é denominada Matéria-prima disponível (*MPD*) com valor inicial igual a zero, a equação (8) define essa variável.

$$MPD = MPD(t - 1) + \int_0^t MPI(t) - MPC(t) dt \quad (8)$$

MPI é uma constante determinada em função da disponibilidade de insumo energético para ser transformado em combustível. Já a Matéria prima consumida (*MPC*), em litros, é dada pela equação (9).

$$MPC = \frac{DG \times CG}{PG} \quad (9)$$

Figura 16- Módulo fontes controladas.



Fonte: Autoria própria.

Sendo que, a Potência inicial e o consumo dependem dos dados técnicos do gerador utilizado. O despacho é dado em função da necessidade de geração de energia, que é modelada levando em consideração a demanda não suprida pelas fontes intermitentes e pelas baterias, representada pela Demanda 1. O equacionamento da variável Demanda 1 é apresentado no módulo gerenciamento de demanda. A disponibilidade de combustível é dada em função da *MPD* e dos insumos energéticos utilizados para produção do combustível.

$$C = C(t-1) + \int_0^t C(t) \times \text{Rendimento} dt \quad (10)$$

Os insumos energéticos variam de acordo com a Matéria-prima utilizada para a produção do combustível, assim como o rendimento. A potência do gerador é uma variável de

nível que acumula ao longo do tempo a potência inserida no sistema por meio da expansão. A partir do despacho do gerador é possível obter o total de energia gerada por fontes controladas. Esse módulo pode ser composto por mais de um combustível.

4.2.1.3 Módulo armazenador

O armazenador escolhido para o desenvolvimento do modelo é a bateria, devido ao fato de ser a tecnologia de armazenamento mais utilizada e também foco no desenvolvimento de tecnologias e pesquisa (FAISAL et al., 2018). O banco de baterias pode operar fornecendo energia ao sistema ou armazenando-a de acordo com a disponibilidade dos recursos. O DEF desenvolvido para o equacionamento das baterias é apresentado na Figura 17.

Na Figura 17- Módulo armazenadores Figura 17 pode-se observar que o diagrama possui somente uma variável de nível ou acumuladora representando as baterias. A descrição das variáveis apresentadas na Figura 17 é retratada na Tabela 5.

Tabela 5- Variáveis do módulo armazenadores.

| Variável | Unidade | Descrição |
|---------------------------------|----------|---------------------------------------|
| <i>VCB</i> | W | Variável de carregamento das baterias |
| <i>CB</i> | Ah | Carga para as baterias |
| <i>CpD</i> | Ah | Capacidade de descarga |
| <i>EMC</i> | Ah | Estado mínimo de carga |
| <i>PEB</i> | W | Potência entregue pelas baterias |
| <i>CD</i> | A | Corrente de descarga |
| <i>AhTN</i> | Ah | Ampère-hora total necessário |
| <i>PA</i> | W | Potência de armazenagem |
| <i>ηbateria</i> | % | Rendimento da bateria |
| <i>AhFB</i> | Ah | Ampère-hora fornecido pelas baterias |
| <i>AT</i> | Horas | Tempo de autonomia necessário |
| <i>NP</i> | Baterias | Número de baterias em paralelo |
| <i>NS</i> | Baterias | Número de baterias em série |
| <i>NB</i> | Baterias | Número de baterias |
| <i>CnB</i> | Ah | Capacidade nominal da bateria |
| <i>DB</i> | Ah | Descarga das baterias |
| <i>EMXC</i> | Ah | Estado máximo de carga |

Fonte: Autoria própria.

A expressão matemática que modela as baterias segue uma regra de decisão, que está de acordo com o estado de carga da bateria, SOC.

$$EMC \leq SOC \leq EMXC$$

- Se as baterias estiverem entre o estado mínimo e máximo de carga, a expressão matemática é dada pela equação (11).

$$Baterias = Baterias(t) + \int_0^t CB(t) - (DB(t) \times NB) dt \quad (11)$$

- Se a diferença entre capacidade das baterias e a capacidade de descarga das baterias for menor que estado mínimo de carga, a expressão matemática é segundo a equação (12).

$$Baterias = Baterias(t) + \int_0^t EMC(t) dt \quad (12)$$

- Se a diferença entre capacidade das baterias e a capacidade de descarga das baterias for maior que estado máximo de carga, a expressão matemática é segundo a equação (13).

$$DB = CpD \quad (15)$$

Já a capacidade de descarga varia conforme a curva da corrente de descarga vezes a capacidade de descarga. Sendo que, a corrente varia com a potência entregue pelas baterias, dada pela equação (16).

$$PEB = DS - Demanda\ 1 \quad (16)$$

No qual as variáveis DS e Demanda 1 serão descritas no módulo gerenciamento de demanda, com isso a expressão para corrente de descarga é segundo a equação (17).

$$CD = \frac{PEB \times V_{ccsistema} \times \eta_{inversor} \times \eta_{bateria} \times NB}{V_{ccbateria}} \quad (17)$$

$V_{ccbateria}$ é a tensão nominal da bateria que varia conforme o tipo de bateria.

A quantidade de ampère-hora a ser armazenado varia de acordo com a potência de armazenagem definida, segundo a equação (18). Sendo que esses valores dependem da eficiência da bateria e do inversor, e da tensão do sistema $V_{ccsistema}$.

$$AhFB = \frac{PA}{V_{ccsistema} \times \eta_{inversor} \times \eta_{bateria}} \quad (18)$$

A variável de ampère-hora necessário é determinada pela multiplicação do tempo de autonomia pelo $AhFB$. A partir de então é possível determinar o número de baterias em série e paralelo que o sistema precisa para atender a potência de armazenagem requerida. Sendo que o número de bateria em paralelo (NP) é dada pela equação (19).

$$NP = \frac{AhTN}{CnB} \quad (19)$$

A capacidade nominal da bateria é definida de acordo com o tipo de bateria. E o número de baterias em série é segundo a equação (20).

$$NBS = \frac{V_{ccsistema}}{V_{ccbateria}} \quad (20)$$

Com isso, é possível determinar o número total de baterias, *NB*, necessárias para o sistema.

4.2.1.4 Módulo gerenciamento de demanda

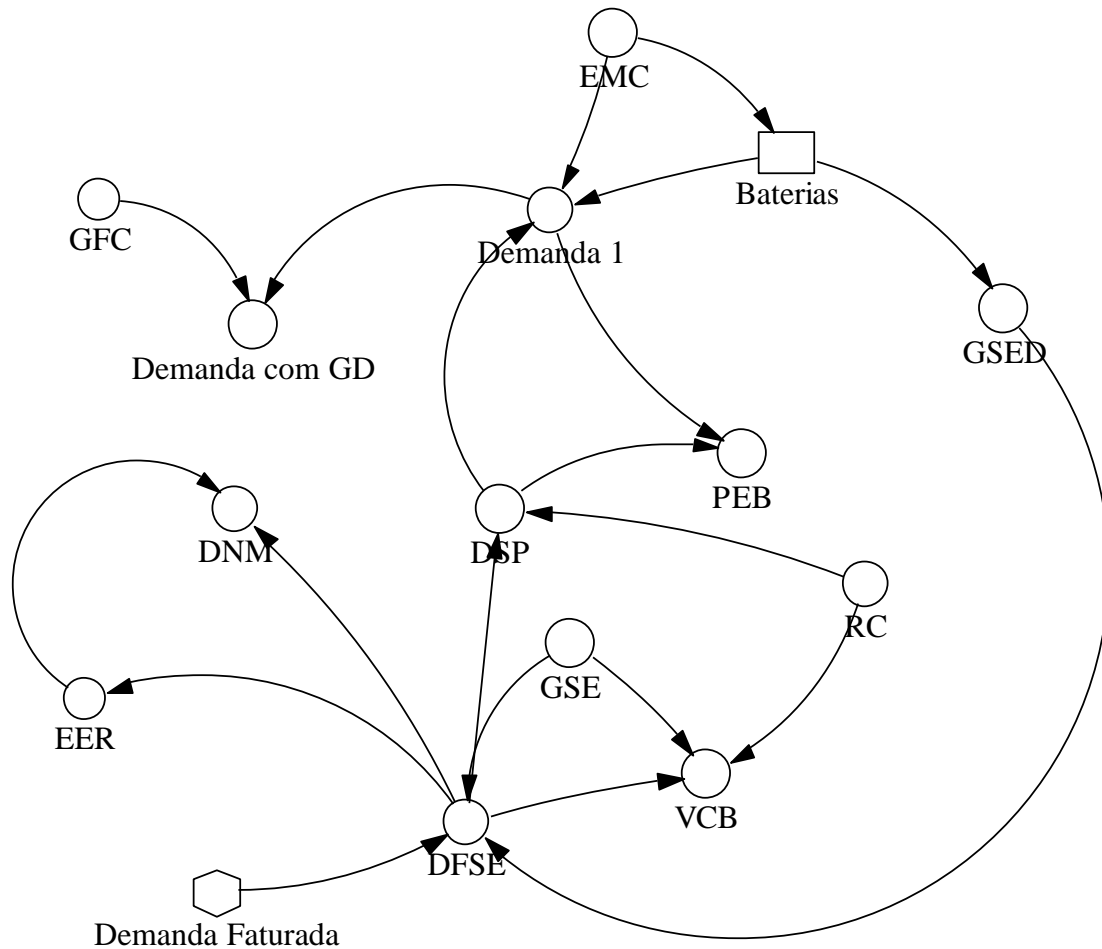
O equacionamento deste módulo depende do tipo de consumidor e da tarifa adotada, tendo em vista que o modelo desenvolvido visa contribuir com os aspectos econômicos da inserção da GD, o equacionamento matemático é apresentado para consumidores constituintes da tarifa azul, contudo, as equações podem ser adaptadas para atender a outros tipos de consumidores. A Tabela 6 apresenta as variáveis utilizadas no módulo gerenciamento de demanda.

Tabela 6- Variáveis do módulo gerenciamento de demanda.

| Variável | Unidade | Descrição |
|-----------------|----------------|--|
| <i>GSED</i> | W | Geração fotovoltaica eólica disponível |
| <i>DSP</i> | W | Demanda a ser suprida |
| <i>DFSE</i> | W | Demanda faturada com fotovoltaica eólica |
| <i>GSE</i> | W | Geração fotovoltaica eólica |
| <i>DNM</i> | W | Demanda com <i>Net Metering</i> |
| <i>EER</i> | W | Energia entregue a rede |
| <i>RC</i> | W | Redução do contrato |
| <i>GFC</i> | W | Geração por fontes controladas |

Fonte: Autoria própria.

Figura 18- Módulo gerenciamento de demanda.



Fonte: Autoria própria.

O equacionamento é apresentado levando em consideração a demanda faturada pela concessionária e a demanda contratada, representada pela variável contrato, sendo que essas são variáveis do tipo dados. A descrição das variáveis desse módulo é apresentada na Tabela 6. A demanda faturada com fotovoltaica eólica é dada pela equação (21).

$$DFSE = Demanda\ Faturada - GSED \quad (21)$$

Visto que a geração fotovoltaica eólica é baseada na seguinte regra de decisão:

- Se a carga das baterias for menor que o total de ampere-hora necessário para manter o carregamento máximo, a geração fotovoltaica eólica disponível será:

$$GSED = GSE - (AhTN - Baterias) \quad (22)$$

- Se a carga das baterias estiver completa, então a geração fotovoltaica eólica disponível será:

$$GSED = GSE \quad (23)$$

A partir da $DFSE$ é possível determinar a demanda com *Net Metering*, DNM , isto é, se a $GSED$ for maior do que a demanda instantânea, o excesso de geração é entregue a rede para ser utilizado posteriormente. A equação (24) representa este equacionamento.

$$DNM = DFSE - EER \quad (14)$$

A energia entregue a rede é acumulada durante o período de um mês, e deve ser utilizada no mês seguinte, segundo a equação (25).

$$EER = \int_0^t GSED(t) - DFSE(t) \quad (25)$$

A partir do equacionamento da demanda faturada com os recursos intermitentes, é feita uma análise da demanda não suprida, se a demanda com *Net Metering* for menor ou igual ao contrato, o valor de DSP é zero, se for maior a expressão da DSP é segundo a equação (26).

$$DSP = DNM - RC \quad (26)$$

A Redução do contrato é obtida quando a demanda com GD é inferior a demanda contratada, essa redução é avaliada anualmente, tendo como base a máxima demanda medida com GD ao longo do ano. A Demanda 1 representa o valor de demanda que deverá ser atendido pelas baterias e é obtido a partir da seguinte regra de decisão:

- Se a carga das baterias for maior do que o estado mínimo de carga e a demanda em ponta a ser suprida for maior que zero, então:

$$Demanda1 = DSP - (Baterias - EMC) \quad (27)$$

- Se uma das condições anteriores for descumprida, a Demanda 1 será igual a DSP .

Caso a carga do banco de baterias não consiga suprir a demanda de ultrapassagem, serão despachadas as fontes controladas por meio dos geradores à combustão, sendo que quem determina a geração é a variável despacho do gerador. A partir do despacho dos recursos é possível obter a Demanda após a inserção da geração distribuída e das baterias, que é expressa pela equação (28).

$$\text{Demanda com GD} = \text{Demanda} - \text{GFC} \quad (248)$$

4.2.1.5 Módulo impacto econômico

Com base na determinação das demandas com e sem geração distribuída é possível modelar os parâmetros da fatura de energia, e assim o impacto econômico. O equacionamento do cálculo da fatura é feito segundo a modalidade tarifária horária azul. O DEF elaborado é apresentado na Figura 19.

Nesse módulo foram criadas algumas variáveis auxiliares, como:

- **Novo mês**, que determina quando inicia o faturamento do mês seguinte.
- **Novo ano**, que determina quando um novo ano da série inicia.
- **Reseta consumo**, responsável por zerar o consumo e começar a contagem do próximo mês.
- **Reseta economia**, responsável por zerar a economia dos meses (REM) e dos anos REA) e começar uma nova contagem.

As variáveis que compõem a fatura de energia, que é responsável por fornecer a economia gerada com a inserção da GD são descritas na Tabela 7.

Tabela 7- Variáveis do módulo impacto econômico.

| Variável | Unidade | Descrição |
|-----------------|----------------|---|
| <i>SCGDP</i> | kWh | Somatório do consumo mensal GD em ponta |
| <i>SCGDFP</i> | kWh | Somatório do consumo mensal GD fora ponta |
| <i>DUGDP</i> | kW | Demanda de ultrapassagem GD em ponta |
| <i>DUGDFP</i> | kW | Demanda de ultrapassagem GD fora ponta |
| <i>MDGDP</i> | kW | Máxima demanda mensal com GD em ponta |
| <i>MDGDFP</i> | kW | Máxima demanda mensal com GD fora ponta |
| <i>MDFP</i> | kW | Máxima demanda faturada em ponta |
| <i>MDFFP</i> | kW | Máxima demanda faturada fora ponta |
| <i>SCFP</i> | kWh | Somatório consumo faturado em ponta |
| <i>SCFFP</i> | kWh | Somatório do consumo faturado fora ponta |
| <i>DUFP</i> | kW | Demanda de ultrapassagem faturada em ponta |
| <i>DUFFP</i> | kW | Demanda de ultrapassagem faturada fora ponta |
| <i>DCP</i> | kW | Demanda contratada em ponta |
| <i>TCP</i> | R\$/kWh | Tarifa de consumo em ponta |
| <i>TCFP</i> | R\$/kWh | Tarifa de consumo fora ponta |
| <i>TUP</i> | R\$/kW | Tarifa de ultrapassagem em ponta |
| <i>TDP</i> | R\$/kW | Tarifa de demanda em ponta |
| <i>TUFP</i> | R\$/kW | Tarifa de ultrapassagem fora ponta |
| <i>TDFP</i> | R\$/kW | Tarifa de demanda fora ponta |
| <i>DCFP</i> | kW | Demanda contratada fora ponta |
| <i>SELM</i> | R\$ | Somatório da economia ao longo dos meses |

Fonte: Autoria própria.

A demanda e o consumo foram divididos de acordo com os períodos em ponta e fora ponta. O sistema de equacionamento é replicado para as variáveis considerando os períodos ponta e fora ponta e os valores com e sem GD. Com o intuito de reduzir o volume de informações e facilitar a compreensão, são apresentadas somente as equações para o período em ponta sem a inserção da GD.

O consumo de energia é calculado pela média de consumo a cada quatro intervalos de tempo que representam uma hora, o somatório de consumo é uma variável do tipo nível e é dado pelo montante de consumo de cada mês, dado pela equação (29).

$$SCFP = \int_0^t \text{Consumo faturado Ponta}(t) - \text{Reseta consumo faturado Ponta}(t) dt \quad (29)$$

A demanda de ultrapassagem é obtida toda vez que a demanda faturada ultrapassa a demanda contratada, sendo que esse valor possui uma tolerância de cinco por cento, de acordo com a equação (30).

$$DUFPP = \text{Demanda faturada Ponta} - \text{Contrato} \quad (3025)$$

Na variável máxima demanda mensal é feita uma comparação entre os valores registrados de demanda, se a demanda registrada for menor do que a demanda contratada é cobrado o valor do contrato, caso seja maior, o valor tarifado é o registrado. O contrato de energia, a demanda contratada e as tarifas são constantes e seus valores variam de acordo com o local em análise. A fatura de energia é dada pela equação (31).

$$\text{Fatura sem GD} = \left(\begin{array}{l} DUFFP \times TUFPP + DUFPP \times TUP + \\ SCFFP \times TCFPP + SCFP \times TCP + \\ MDFP \times TDP + MDFFP \times TDFP \end{array} \right) + ICMS \quad (3126)$$

Sendo que o valor do ICMS varia de acordo com cada estado brasileiro. O valor da fatura é calculado também para o sistema com GD, e então, é possível obter o valor da economia mensal através da equação (32).

$$\text{Economia mensal} = \int_0^t (\text{Fatura sem GD}(t) - \text{Fatura com GD}(t)) - \text{REM}(t) dt \quad (272)$$

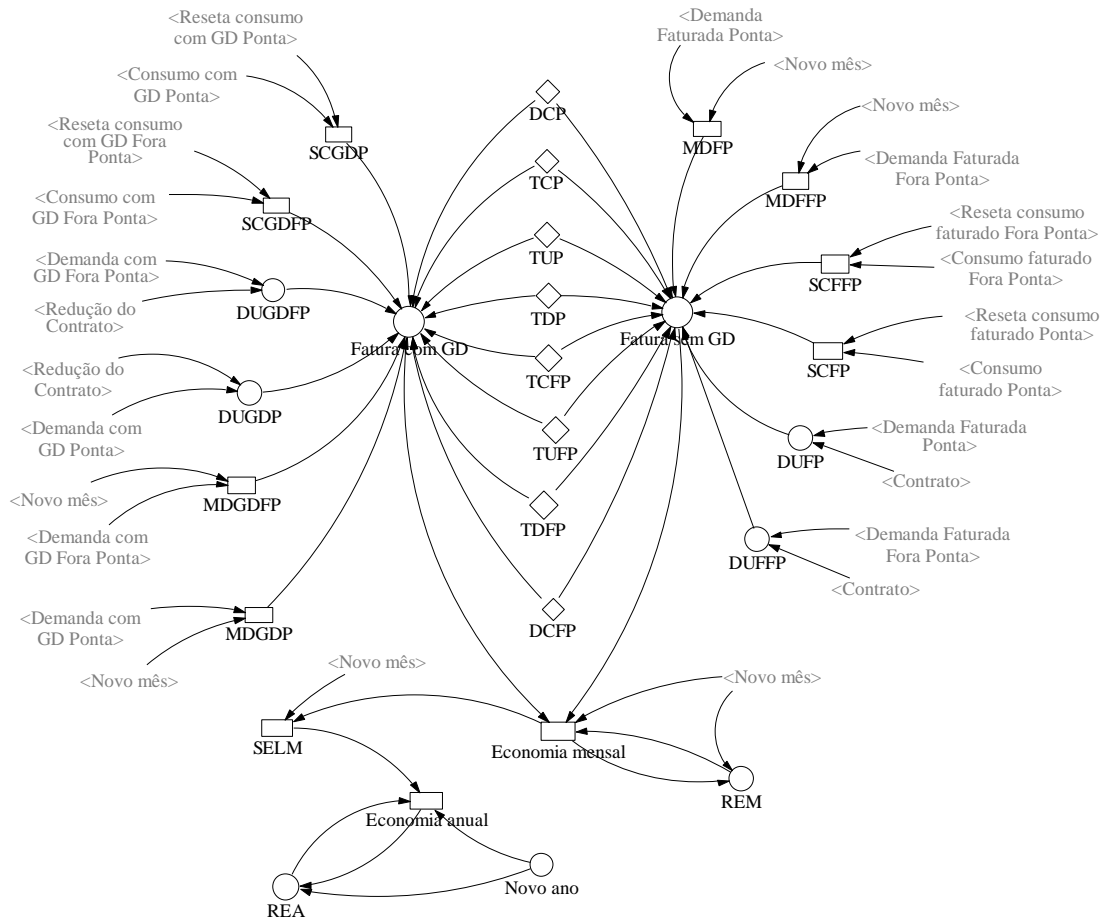
)

A economia anual é dada por (33):

$$\text{Economia anual} = \int_0^t (\text{SELM}(t)) - \text{REA}(t) dt \quad (33)$$

O DEF desenvolvido para o módulo impacto econômico é apresentado na Figura 19.

Figura 19- Módulo impacto econômico.



Fonte: Autoria própria.

4.2.1.6 Módulo fluxo de caixa

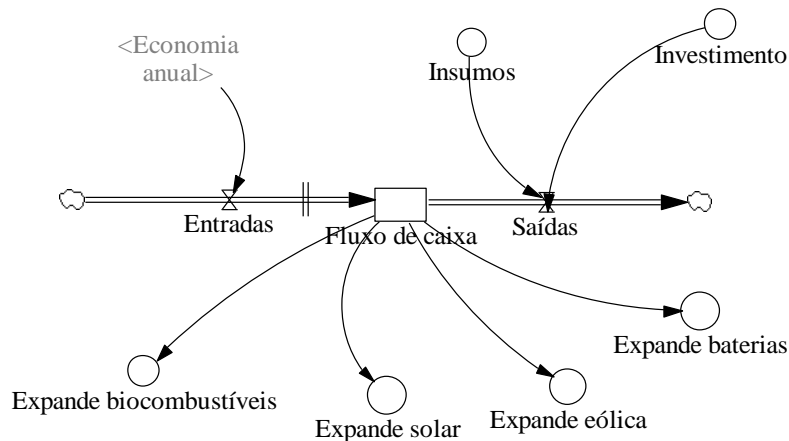
O fluxo de caixa é calculado a partir dos valores, em reais, das entradas e saídas, de acordo com a equação (34):

$$Fluxo\ de\ caixa = Fluxo\ de\ caixa(t - 1) + \int_0^t Entradas(t) - Saídas(t) dt \quad (284)$$

Sendo que as entradas são representadas pelo somatório da economia mensal e as saídas são constituídas dos insumos utilizados na geração das fontes controladas e dos investimentos

em geração intermitente e armazenamento. A Figura 20 apresenta o DEF para o módulo fluxo de caixa.

Figura 20- Módulo impacto econômico.



Fonte: Autoria própria.

Enquanto o fluxo de caixa é negativo não há expansão do sistema e a economia é utilizada para custear os investimentos, quando o fluxo de caixa se torna positivo é possível acumular um montante, ao longo de um período determinado, para a expansão do sistema. A expansão do sistema pode ocorrer com o aumento da geração, aumento dos armazenadores ou aumento dos insumos energéticos. A escolha pelo tipo de expansão é determinada previamente.

4.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o modelo desenvolvido para integração de recursos em uma microrrede com gerenciamento de demanda. Os módulos do modelo foram apresentados, bem como o seu equacionamento. A seguir o modelo é aplicado a um caso específico para comprovar a viabilidade da proposta.

5 APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO PROPOSTO

A partir da possibilidade de realimentação de um sistema, a técnica de Dinâmica de Sistemas foi adotada para análise econômica da integração de recursos energéticos como forma de gerenciamento de demanda. Tendo-se apresentado a metodologia geral que pode ser aplicada em diferentes casos, partiu-se então para um estudo de caso.

Devido à recessão econômica nacional, diversos setores públicos têm passado por contingenciamento orçamentário e um dos setores que vem sofrendo com esses contingenciamentos é a educação, com isso diversas universidades estão com restrições de desenvolvimento (PORTARIA Nº 23, de 12 de fevereiro de 2015). Ao considerar essa problemática, optou-se por realizar um estudo sobre a integração dos recursos energéticos disponíveis na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Além das restrições de gasto, a universidade possui custos elevados com energia elétrica, sendo que atualmente o valor da fatura mensal ultrapassa um milhão de reais.

A UFSM é uma instituição de ensino superior pública e federal, localizada em Santa Maria no Rio Grande do Sul, com aproximadamente 26.818 alunos, distribuídos em 89 cursos. Além do campus central, a universidade possui unidades universitárias em Frederico Westphalen, Palmeira das Missões e Cachoeira do Sul. A extensão de área do campus sede é de 1.863,57 hectares com 239.578 metros quadrados de área construída.

Os recursos energéticos escolhidos para a simulação são energia fotovoltaica e eólica no módulo das fontes intermitentes, biodiesel e etanol para as fontes controladas e baterias como armazenadores. A escolha por estes recursos é devido ao fato da universidade já possuir os recursos necessários para este tipo de geração, com exceção da geração eólica.

5.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

De acordo com (FORD, 1999), esta fase corresponde a 5ª etapa, de estimação dos valores dos parâmetros e deve ser feita para cada uma das variáveis. Os valores dos parâmetros são os dados de entrada do modelo, representados por:

- Demanda;

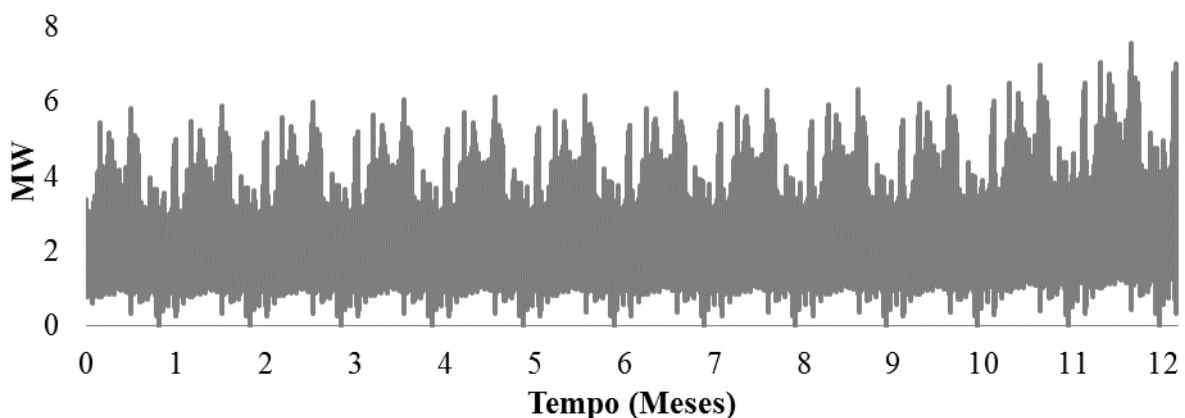
- Fontes intermitentes: Dados técnicos dos módulos fotovoltaicos e aerogeradores, bem como dados de irradiação, temperatura e velocidade do vento;
- Fontes controladas: Dados técnicos dos geradores com despacho controlado e dos combustíveis;
- Armazenadores: Dados técnicos das baterias e potência de armazenagem necessária.

5.1.1 Demanda

A UFSM integra o subgrupo A4 e participa da modalidade tarifária Azul, com isso a fatura de energia é composta pela demanda contratada, pelo consumo e pela ultrapassagem de demanda nos períodos de ponta e fora ponta.

Os dados de demanda utilizados são do período compreendido entre 12/09/2016 a 12/09/2017, totalizando 12 meses. Esses dados foram obtidos junto à concessionária de energia, a partir da compra dos dados de memória de massa por parte da universidade e são apresentados a cada quinze minutos. Os dados de demanda são apresentados na Figura 21.

Figura 21- Curva de demanda.



Fonte: Autoria própria.

Os valores contratados de demanda em ponta e fora ponta são, respectivamente, 3 MW e 5 MW. A demanda não suprida representa o excedente medido em relação a demanda

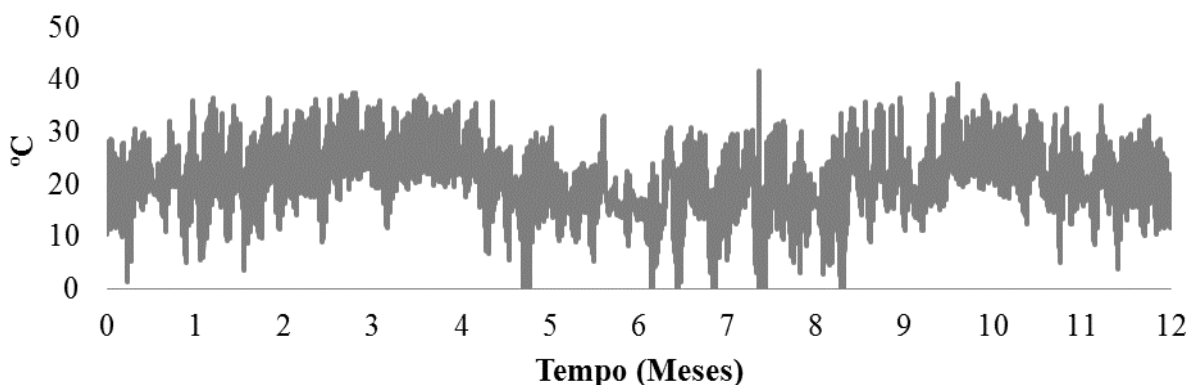
contratada. Quando a demanda medida ultrapassa 5% da demanda contratada, é aplicada uma penalidade por ultrapassagem de demanda.

Ao considerar que em um ano não é possível obter uma análise completa do tempo de retorno do investimento, a série de demanda apresentada na Figura 21 é replicada considerando um fator de crescimento anual de carga de 2%, totalizando 12 anos de dados.

5.1.2 Fontes intermitentes

As fontes de geração de energia utilizadas nesse módulo foram energia fotovoltaica e eólica. Sendo que, para o cálculo da energia fotovoltaica são utilizadas séries de dados de irradiação e temperatura e para a energia eólica são utilizadas série de dados de velocidade do vento. As séries foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a partir da estação de Santa Maria, assim como os dados de demanda, essas séries foram replicadas ao longo de treze anos. Os dados de temperatura para a região de Santa Maria são apresentados na Figura 22.

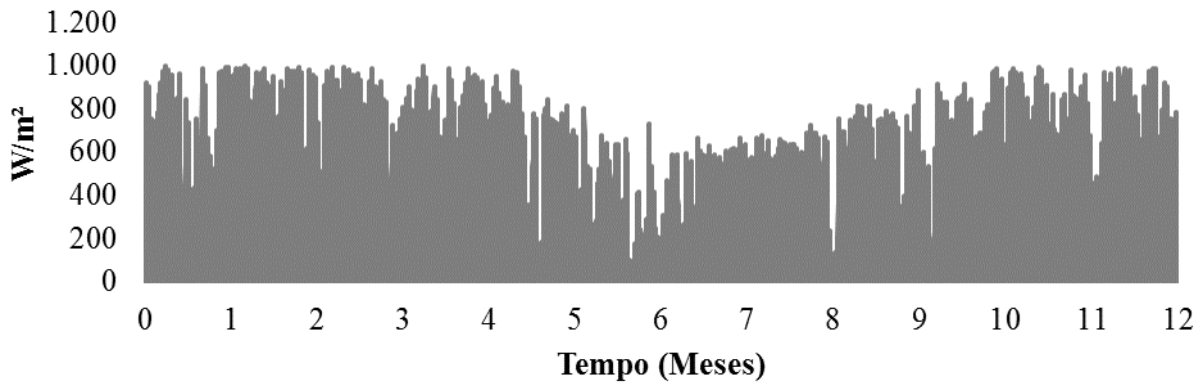
Figura 22- Série de dados de temperatura para a região de Santa Maria.



Fonte: Autoria própria, com dados do INMET.

Baseado na Figura 22 é possível observar que as temperaturas para a região permanecem elevadas na maior parte do ano, com uma temperatura média de 20 °C. Os dados de irradiação são apresentados na Figura 23.

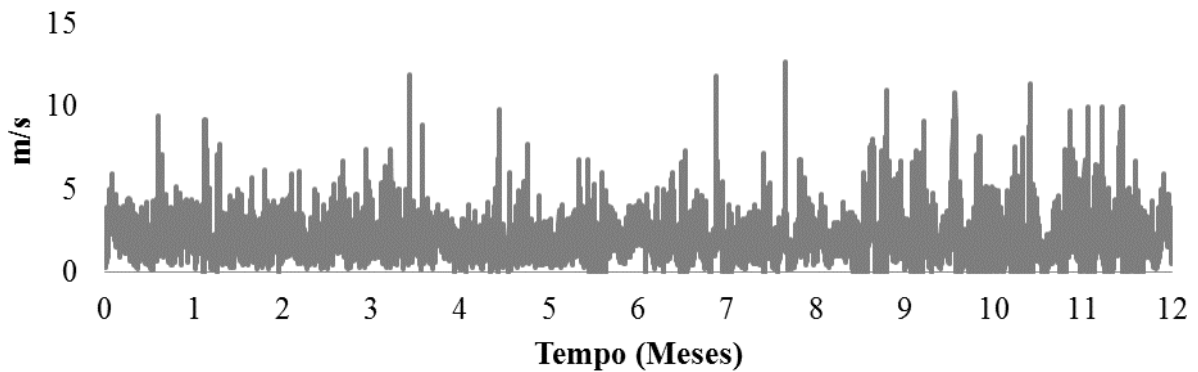
Figura 23- Série de dados de irradiação para a região de Santa Maria.



Fonte: Autoria própria, com dados de INMET.

O perfil da curva de irradiação é semelhante ao de temperatura, com os maiores valores de irradiação nos meses de verão, de dezembro a março. Contudo, ao contrário da temperatura, quanto maior a irradiação, maior o aproveitamento energético dos módulos. Os dados de velocidade do vento são expostos na Figura 24.

Figura 24- Série de dados de velocidade do vento para a região de Santa Maria.



Fonte: Autoria própria, com dados de INMET.

Os dados de velocidade do vento possuem uma distribuição mais uniforme ao longo do ano, com uma velocidade média igual a 2 m/s .

Após a inserção das séries de dados apresentados, são inseridas as características técnicas dos módulos, aerogeradores e baterias. O módulo escolhido para aplicação no presente estudo de caso foi o modelo Canadian CSI CS6P-260P com as características apresentadas na Tabela 8, com um custo igual a R\$ 722 por unidade.

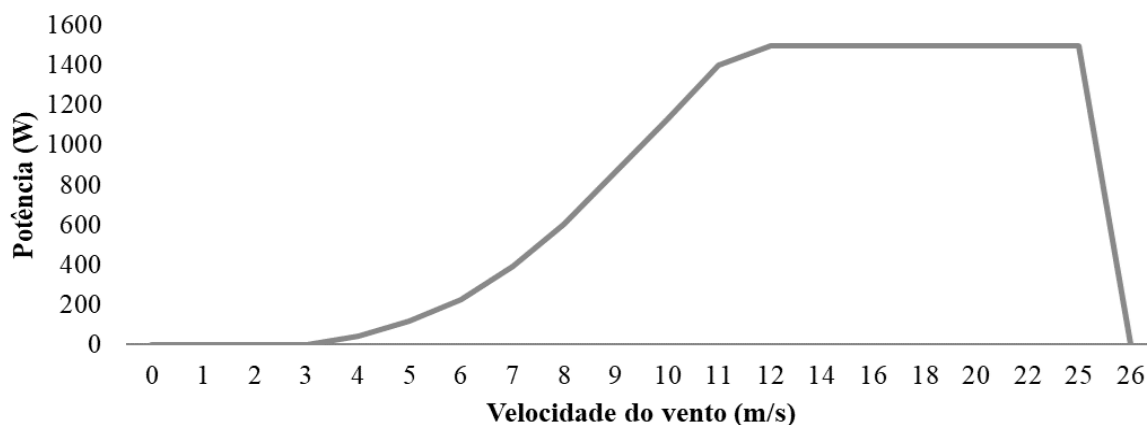
Tabela 8- Dados do módulo fotovoltaico.

| | |
|---------------------------------------|------|
| Potência da placa (Wp) | 260 |
| I_{max} (A) | 12 |
| I_{cc} (A) | 9,14 |
| V_{ca} (V) | 38,1 |
| V_{max} (V) | 1000 |
| I_{o max} (A) | 100 |
| N_{sm} (células) | 60 |
| Eficiência (%) | 16 |
| Tensão operacional (V) | 30,7 |
| Corrente operacional (A) | 8,47 |
| Área do módulo (m²) | 65 |

Fonte: Adaptado de Canadian.

Os valores de referência de temperatura e irradiação utilizados são de 25 °C e 1000 W/m². Para a geração eólica, foi escolhida uma turbina modelo GE 1.5 SL com potência máxima de 1,5 kW. O custo do aerogerador foi considerado igual a R\$ 10.000. A curva de potência do aerogerador é apresentada na Figura 25.

Figura 25- Curva de potência do aerogerador.



Fonte: Wind turbine models.

5.1.3 Fontes controladas

Para a geração de energia com despacho controlado foram utilizados como combustível o biodiesel e o etanol. A escolha dos combustíveis foi feita com base no fato da universidade

possuir uma microdestilaria e também uma planta de geração de biodiesel a partir do aproveitamento de resíduos de óleo vegetal.

Em 2009 foi implantada a Usina Piloto de Etanol no Colégio Politécnico da UFSM, essa usina é capaz de produzir 130 litros de etanol por batelada, provenientes de matérias-primas, como, cana-de-açúcar, sorgo sacarino, batata inglesa, batata doce, mandioca, arroz e triticale. Contudo, em 2010 foi estabelecido um Convênio de Cooperação Técnica entre a Delegacia da Receita Federal do Brasil em Santa Maria/RS (DRF/STM) e a Usina para a transformação das bebidas apreendidas em etanol, a ser utilizado como combustível, álcool líquido e/ou álcool gel (EMMEL et al., 2015). Dessas aplicações, a maior demanda é de etanol combustível, utilizado na frota de veículos da universidade, entretanto, a demanda para este fim é bem menor do que a capacidade de produção do combustível. Tendo em vista esse fato, o presente trabalho busca a destinação desse recurso para aplicação em geradores de energia elétrica.

Além da usina de produção de etanol, o Colégio Politécnico conta com uma planta para produção de biodiesel proveniente dos resíduos de óleo vegetal de cozinha, gerados pelo Restaurante Universitário, pelas 11 lancherias do campus e pelo restaurante do HUSM, com o objetivo inicial de evitar o descarte incorreto desse resíduo e também abastecer alguns veículos da universidade. Tendo em vista que essa pequena usina não tem capacidade de processar toda a matéria-prima recebida, está sendo implantada uma planta semi-industrial que terá capacidade de processar toda a quantidade de resíduo obtida na universidade e ainda expandir a arrecadação de resíduos para a comunidade.

Considerando esse contexto, buscou-se analisar a viabilidade de utilização desses combustíveis na geração de energia elétrica, para isso o módulo de fontes intermitentes foi adaptado para utilização do etanol e biodiesel como combustíveis. Os dados de entrada necessários a cada combustível são apresentados nas seções 5.2.1 e 5.2.2.

5.1.4 Armazenadores

Como armazenadores do sistema são utilizadas baterias, sendo que o modelo escolhido foi SURRETTE 4KS25P, com as características apresentadas na Tabela 9. O custo considerado para a bateria é de R\$ 4.486,00.

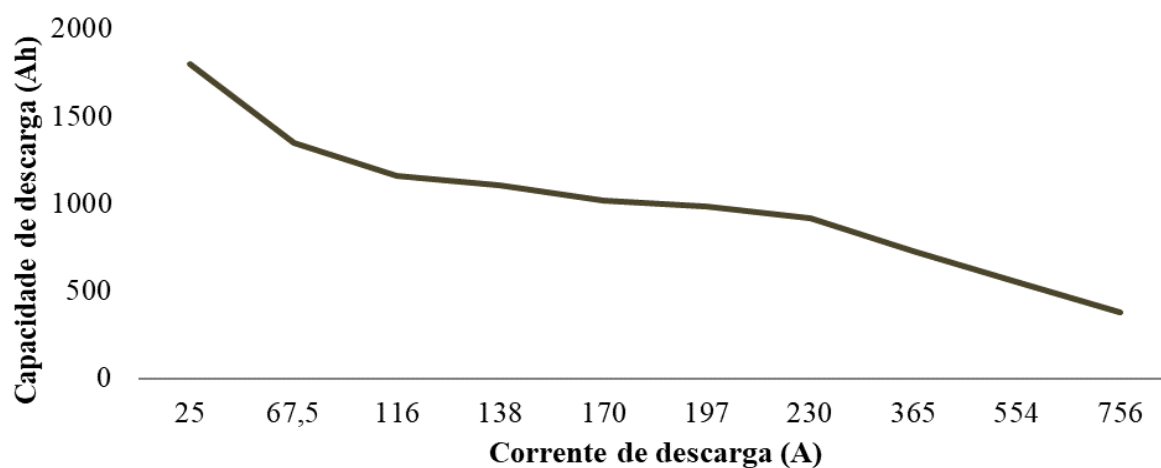
Tabela 9- Dados baterias.

| | |
|-----------------------------------|------|
| Capacidade nominal (Ah) | 1900 |
| Tensão nominal (V) | 4 |
| Eficiência (%) | 80 |
| Estado mínimo de carga (%) | 40 |

Fonte: Adaptado de Rolls Battery Engineering.

A curva de descarga da bateria utilizada é apresentada na Figura 26.

Figura 26- Curva de descarga da bateria.



Fonte: Rolls Battery Engineering

5.1.5 Tarifas

As tarifas de energia utilizadas para aplicação no estudo de caso são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10- Tarifas de energia

| Descrição | Tarifa (R\$) |
|--|---------------------|
| Consumo em ponta | 0,402 |
| Consumo fora ponta | 0,249 |
| Demanda em ponta | 38,63 |
| Demanda fora ponta | 13,47 |
| Ultrapassagem de demanda em ponta | 77,26 |
| Ultrapassagem de demanda fora ponta | 26,94 |

Fonte: RGE Sul, 2018.

5.2 ADEQUAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO

Considerando o modelo proposto, é necessário que sejam feitas algumas adaptações nos módulos para que se enquadrem as características do local em estudo, com isso, no presente estudo de caso, foi necessário ajustar o módulo das fontes controladas, dividindo em dois submódulo: etanol e biodiesel.

5.2.1 Submódulo etanol

Levando em consideração que o processo de produção do etanol, para este caso, é a destilação, e a matéria-prima não tem custo pois são as bebidas apreendidas pela receita federal. O custo de produção desse combustível é apenas o valor gasto com a lenha utilizada na caldeira, que é de 60 R\$/m³ de lenha. As variáveis utilizadas no submódulo etanol são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11- Variáveis submódulo etanol.

| Variável | Unidade | Descrição |
|------------------|--------------------|--|
| <i>QLC</i> | m ³ | Quantidade de lenha consumida |
| <i>QBR</i> | Litros | Quantidade de bebida recebida na microdestilaria |
| <i>Etanol</i> | Litros | Disponibilidade de etanol |
| <i>CE</i> | Litros | Consumo de etanol |
| <i>Biodiesel</i> | Litros | Disponibilidade de biodiesel |
| <i>DG</i> | Adimensional | Despacho do gerador |
| <i>DG2</i> | Adimensional | Despacho do segundo gerador |
| <i>CGE</i> | Litros / (1/4)hora | Consumo do gerador a etanol |
| <i>PGE</i> | Watts | Potência do gerador a etanol |
| <i>PGB</i> | Watts | Potência do gerador a biodiesel |
| <i>GE</i> | Watts | Geração com etanol |

Fonte: Autoria própria.

O reservatório de lenha é uma variável de nível, com a expressão matemática apresentada na equação (35):

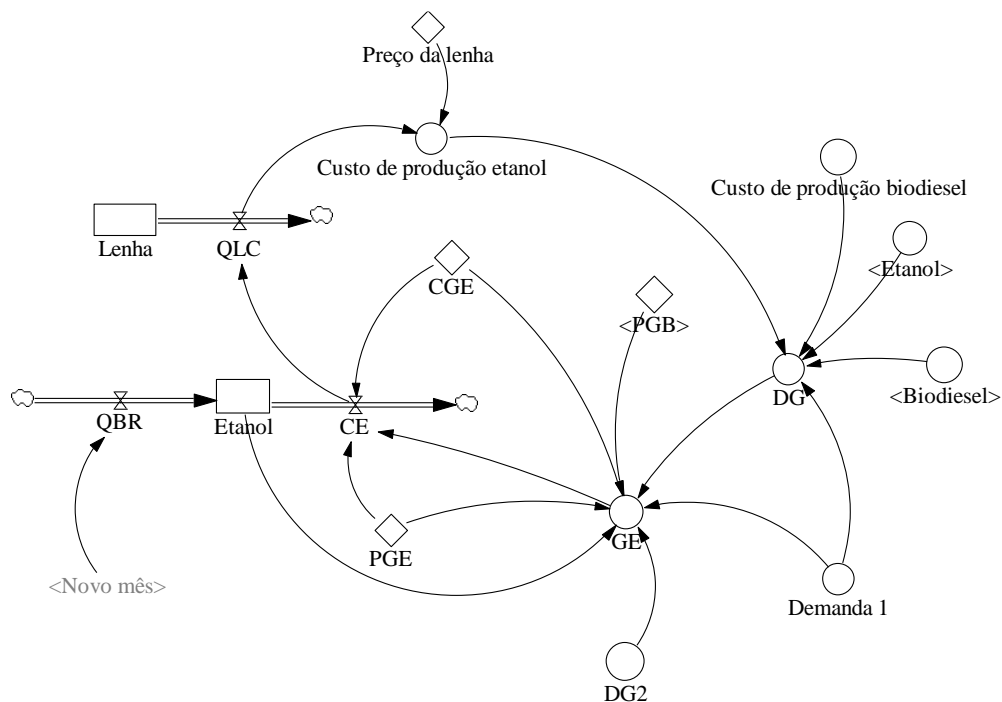
$$Lenha = Lenha(t - 1) + \int_0^t Lenha(t) - QLC(t) dt \quad (35)$$

Sendo que, a quantidade de lenha em $t=0$ foi definida igual a 100m^3 . A quantidade de lenha consumida, QLC , é dada pela equação (36).

$$QLC = CE \times \frac{1}{130} \quad (36)$$

O DEF elaborado para a geração de energia utilizando como combustível o etanol é apresentado na Figura 28.

Figura 27- DEF para o submódulo etanol.



Fonte: Autoria própria.

A razão $1/130$ é quantidade de lenha utilizada por litros produzidos de etanol. Já o consumo de etanol, CE , segue a seguinte regra de decisão:

- Se a energia gerada a etanol, GE , for maior que zero, a equação é:

$$CE = GE \times \frac{CGE}{PGE} \quad (297)$$

- Se a energia gerada a etanol, GE , for igual a zero, então CE será igual a zero.

A quantidade de bebida recebida, QBR , é uma variável acumuladora, que a cada novo mês acresce 6.000 mil litros de bebida alcoólica. Com isso, é possível determinar a quantidade de *Etanol* que é armazenada, com a seguinte expressão (38):

$$Etanol = Etanol(t - 1) + \int_0^t (QBR(t) \times 0,2) - CE(t) dt \quad (308)$$

O valor 0,2 representa o teor médio de álcool presente nas bebidas aprendidas. O despacho do gerador, DG , determina se o gerador a ser despachado é a etanol ou biodiesel, de acordo com o custo de produção e com a disponibilidade de cada combustível. Se DG for igual a 1, despacha o gerador a etanol, se for igual a 2 despacha o gerador a biodiesel. Caso a energia gerada a partir desse despacho não seja suficiente para suprir a demanda, é feito um novo despacho, $DG2$, seguindo as seguintes regras:

- Se a Demanda 1 for maior que a potência do gerador a etanol, PGE , e o despacho do gerador, DG , for igual a 1, despacha o gerador a biodiesel representado pelo número 4.
- Se a Demanda 1 for maior que a potência do gerador a biodiesel, PGB , e o despacho do gerador, DG , for igual a 2, despacha o gerador a etanol representado pelo número 3.

A partir disso, obtém-se a geração a etanol, GE , de acordo com as seguintes regras de decisão:

- Se $DG=1$, $Etanol > CGE$ e $Demanda 1 < PGE$, $GE = Demanda 1$
- Se $DG=1$, $Etanol > CGE$ e $Demanda 1 \geq PGE$, $GE = PGE$
- Se $DG2=3$, $Demanda 1 - PGB > PGE$, $GE = PGE$
- Se $DG2=3$, $Demanda 1 - PGB < PGE$, $GE = Demanda 1 - PGB$

O primeiro despacho é feito com base no custo de produção do combustível, já o segundo é com base no suprimento de demanda restante.

5.2.2 Submódulo biodiesel

A produção do biodiesel é a partir de uma reação de transesterificação e os dados utilizados para simulação do modelo elaborado para o biodiesel são obtidos de (FANTINEL, 2016), tendo em vista que a planta industrial utilizada nessa pesquisa é a mesma que está sendo implantada na universidade. O processo de produção do biodiesel é a partir da transesterificação, essa reação utiliza um álcool primário, como metanol, etanol, propanol ou butanol e um catalisador que pode ser ácido, básico ou enzimas gerando como produto ésteres alquílicos de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol como subproduto da reação. A matéria-prima considerada é o óleo residual obtido dentro do campus. Para a reação de transesterificação utilizou-se metanol e como catalisador o metilato de sódio, o balanço de massa da reação é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12- Balanço de massa da reação de produção do biodiesel.

| Reagentes | Entrada de Processo (l) | Saída de Processo (l) |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Óleos de fritura | 0,98 | |
| Metanol | 0,15 | 0,04 |
| Metilato de Sódio | 0,03 | |
| Corrente de Glicerina | | 0,11 |
| Corrente de Biodiesel | | 1 |
| Total | 1,16 | 1,15 |

Fonte: Adaptado de (FANTINEL, 2016).

Os custos considerados no processo (Tabela 13), englobam despesas com catalisador, metanol e despesas fixas que consideram mão de obra, depreciação das instalações, depreciação dos equipamentos e resina de polimento utilizada para purificação do biodiesel. O metanol pode também ser obtido no processo de destilação, contudo possui um custo de recuperação de um real por litro. Sendo que esses custos devem ser supridos pela economia gerada com a utilização do gerador. A planta possui capacidade de produção de 200 litros por batelada e um total de 600 litros por dia, considerando uma jornada de trabalho de 10 horas diárias (FANTINEL, 2016).

Tabela 13- Custos de produção do biodiesel.

| Custo | R\$/L |
|-------------------------------|--------------|
| Metanol | 2,25 |
| Catalisador | 0,16 |
| Recuperação do Metanol | 1 |
| Despesas fixas | 0,18 |

Fonte: Adaptado de (FANTINEL, 2016).

A Tabela 14 apresenta a sigla e a descrição de cada variável presente nesse submódulo.

Tabela 14- Variáveis submódulo biodiesel.

| Variável | Unidade | Descrição |
|------------|-------------------|----------------------------------|
| <i>CM</i> | Litros | Consumo de metanol |
| <i>MR</i> | Litros | Quantidade de metanol recuperado |
| <i>MPI</i> | Litros | Matéria-prima inicial |
| <i>CMP</i> | Litros | Consumo de matéria-prima |
| <i>RMP</i> | Litros | Rendimento da matéria-prima |
| <i>CGB</i> | Litros/ (1/4)hora | Consumo do gerador a biodiesel |
| <i>GG</i> | Litros | Geração de glicerina |
| <i>CMS</i> | Litros | Consumo de metilato de sódio |
| <i>MS</i> | Litros | Metilato de sódio armazenado |
| <i>MT</i> | Litros | Metanol armazenado |
| <i>CBD</i> | Litros | Consumo de biodiesel |

Fonte: Autoria própria.

O total de litros consumidos de biodiesel é obtido na medida em que o gerador é despachado, com isso, é possível obter o custo de produção baseado no consumo de reagentes. A quantidade de metanol armazenado, *MT*, é dada pela equação (39):

$$MT = MT(t - 1) + \int_0^t CM + MR (t) dt \quad (39)$$

Sendo que *MR* é o valor de metanol recuperado e *CM* o consumido, dado pela seguinte expressão:

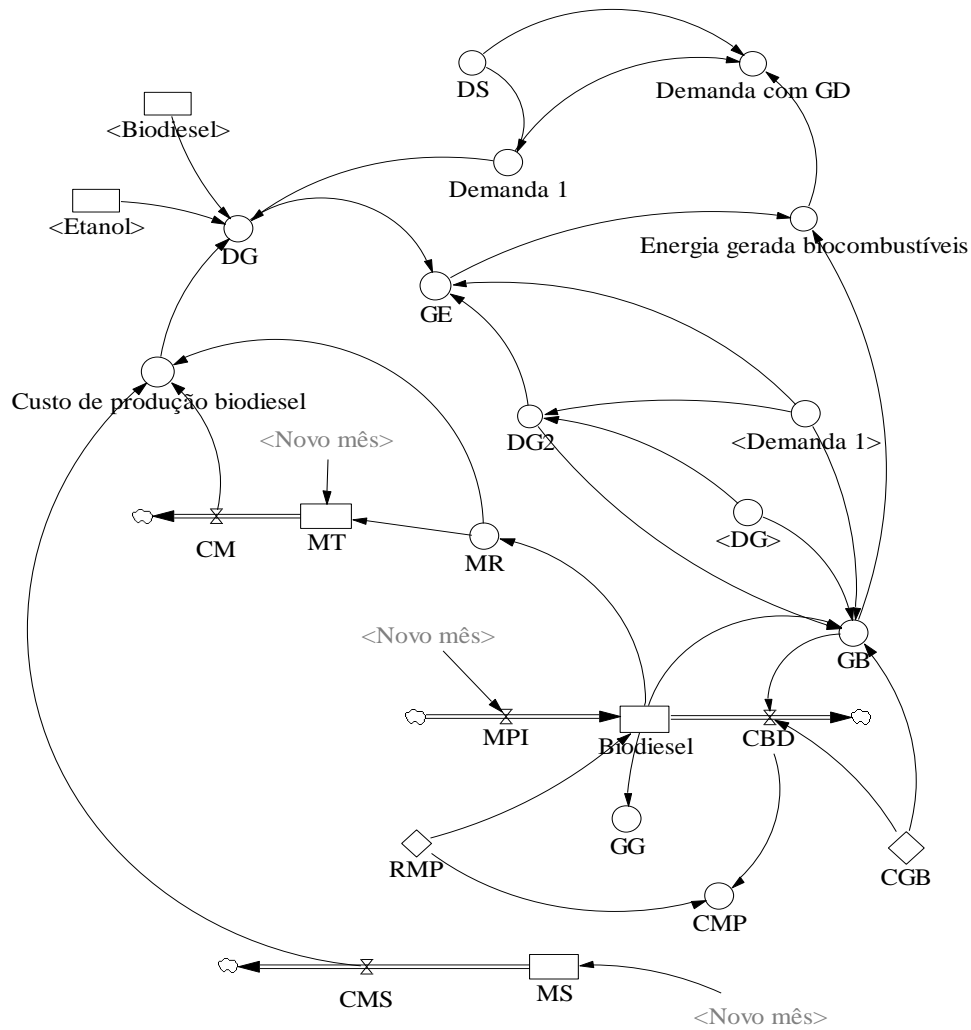
$$CM = CBD \times 0,14 \quad (4031)$$

O valor 0,14 representa a razão entre a produção de um litro de biodiesel e o consumo de metanol. A equação (41) fornece a quantidade armazenada de metilato de sódio, *MS*:

$$MS = MS(t - 1) - \int_0^t CMS (t) dt \quad (4132)$$

O submodelo biodiesel é apresentado na Figura 28, onde o custo de produção é baseado no consumo de reagentes.

Figura 28- DEF para o submódulo biodiesel.



Fonte: Autoria própria.

A expressão que determina o consumo de metilato de sódio, CMS , é semelhante equação (38) $CM = CBD \times 0,14(4031)$, contudo, a razão é de 0,027 litros de metilato para um litro de biodiesel produzido. Assim, o total de biodiesel armazenado é dado pela equação (42):

$$Biodiesel = Biodiesel(t - 1) \int_0^t (MPI(t) \times RMP) - CBD(t) dt \quad (332)$$

Onde MPI é a matéria-prima inicial e RMP é o rendimento da matéria prima. A partir da disponibilidade de combustível e da necessidade de geração, é possível obter a energia gerada com biodiesel, dada pela seguinte regra:

- Se $DG=2$, $Biodiesel > CGB$ e $Demanda 1 < PGB$, $GB = Demanda 1$
- Se $DG=2$, $Biodiesel > CGB$, $GB = PGB$
- Se $DG=4$, $Demanda 1 - PGE > PGB$, $GB = PGB$
- Se $DG=4$, $Demanda 1 - PGE < PGB$, $GB = Demanda 1 - PGE$

Com a geração obtida a partir dos dois combustíveis, é possível determinar a Demanda com GD, da seguinte forma:

$$Demanda\ com\ GD = Demanda\ 1 - Energia\ gerada\ biocombustíveis \quad (43)$$

5.2.3 Fluxo de Caixa

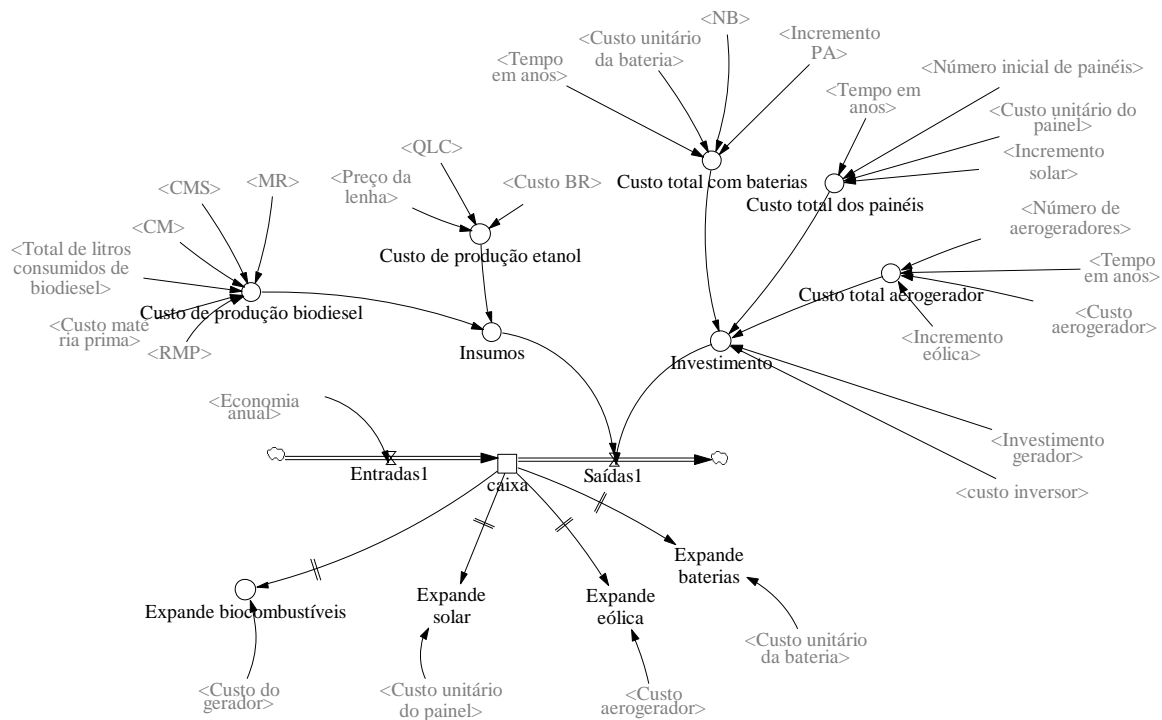
Com base na demanda com GD é possível obter a economia gerada com a inserção da geração distribuída. Esse valor representa a entrada de recursos no fluxo de caixa, enquanto que a saída é dada pela soma dos investimentos com os custos dos insumos. Dentro dos investimentos está o custo dos aerogeradores, dos módulos fotovoltaicos, dos inversores e das baterias. E nos insumos, o custo de produção do biodiesel e etanol.

O fluxo de caixa é dado pela expressão (44):

$$Caixa = Caixa(t - 1) + \int_0^t Entradas(t) - Saídas(t) dt \quad (44)$$

Enquanto os investimentos não são quitados o fluxo de caixa é negativo, após passa a ser positivo, e então é possível expandir o sistema, seja investindo em geração ou armazenadores, contudo, a expansão não é instantânea, é necessário um tempo para acumular determinado montante para que seja possível investir na ampliação do sistema. O DEF referente ao fluxo de caixa adaptado para o presente estudo de caso é apresentado na Figura 29.

Figura 29- DEF para o fluxo de caixa.



Fonte: Autoria própria.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fim de comprovar a consistência do modelo, é aplicada a 6ª etapa segundo (FORD, 1999), intitulada etapa de simulação. Grande parte dos sistemas produz respostas qualitativas, omitindo parâmetros, entradas externas e condições iniciais que são necessárias para especificar o modelo, assim, a simulação é a única maneira prática de testar esses modelos. Contudo, a simulação mental de modelos complexos torna-se ineficaz pela complexidade dinâmica, atrasos no tempo, realimentação ambígua e habilidades de raciocínio fracas. Dessa forma, a simulação através de modelos formais fornece uma maior precisão (STERMAN, 2000).

5.3.1 Análise de sensibilidade

A robustez do modelo e a estabilidade da solução frente a variação dos parâmetros é possível através da análise de sensibilidade. Essa análise pode ser realizada considerando o impacto no resultado final das mudanças dos parâmetros. Segundo (BAUMGARTEN, 2016), devem ser consideradas as seguintes etapas para o teste de sensibilidade:

- a. Selecionar as variáveis que mais afetam o comportamento do modelo;
- b. Modificar essas variáveis e efetuar a validação dos resultados;
- c. Identificar as variáveis que afetam significativamente o comportamento do modelo;
- d. Analisar se a mudança no comportamento é coerente.

A aplicação dessas etapas comprovou a robustez do modelo e definiu que as variáveis que apresentam maior sensibilidade são relacionadas ao incremento das fontes de geração e a disponibilidade de recurso. Dessa forma, foram testados alguns cenários onde foi possível alterar esses parâmetros.

5.3.2 Cenário referência

A simulação inicial foi realizada utilizando a disponibilidade real de biocombustíveis e de recursos de geração no campus da universidade, como mostra a Tabela 15. Além desses parâmetros foram utilizados os dados apresentados nas seções 6.1 e 6.2, que caracterizam as variáveis de recurso disponíveis no local, bem como as características de demanda. É importante ressaltar que os valores apresentados na Tabela 15 para os biocombustíveis são referentes as condições atuais do campus.

Tabela 15- Parâmetros iniciais para o caso base.

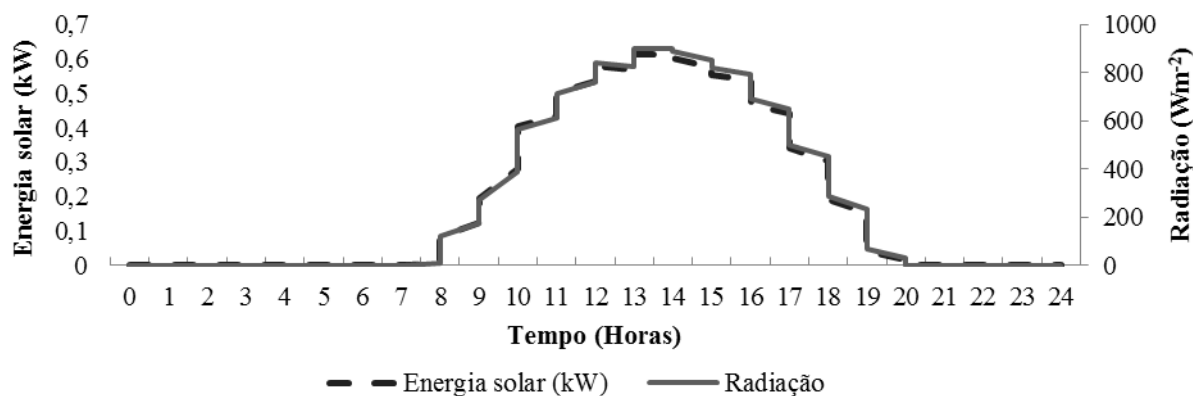
| | |
|---|---------------|
| Matéria-prima mensal para produção de biodiesel | 230 litros |
| Matéria-prima mensal para produção de etanol | 30.000 litros |
| Potência do gerador | 635 kVA |
| Quantidade inicial de módulos fotovoltaicos | 3.000 |
| Potência de armazenagem | 1 MW |
| Quantidade inicial de aerogeradores | 4 |
| Crescimento anual de demanda | 2% |

Fonte: A autoria própria.

Com base na inserção dos parâmetros de entrada no modelo obteve-se as curvas referentes aos submódulos apresentados. A seguir serão detalhados os principais resultados de cada submódulo, iniciando pelas fontes intermitentes. A análise de alguns resultados é dificultada quando a série de dados de doze anos é retratada, por isso os resultados serão apresentados em dia, ano e para a série completa dependendo do parâmetro.

A geração de energia através das fontes solar e eólica é baseada nas curvas de irradiação, temperatura e velocidade do vento. A Figura 30 apresenta a curva de irradiação e a energia fotovoltaica gerada para um dia no mês de setembro, a curva contempla a soma da potência gerada pelos 3.000 módulos considerados inicialmente.

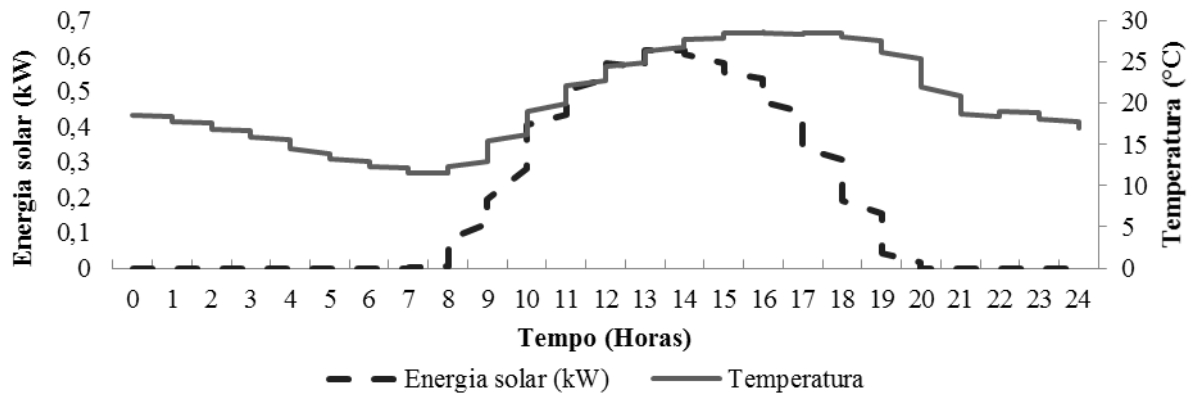
Figura 30- Radiação e energia solar gerada.



Fonte: Autoria própria.

Outro fator que interfere diretamente na geração fotovoltaica é a temperatura, na Figura 31 é possível observar o comportamento da geração em função da temperatura. Quanto maior a temperatura, menor a tensão e a corrente, conseqüentemente menor a produção de energia de cada módulo.

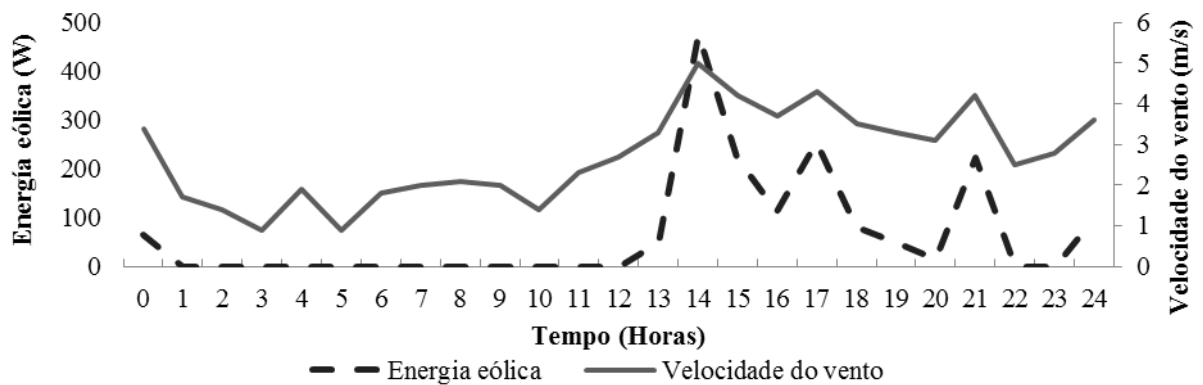
Figura 31- Temperatura e energia solar gerada.



Fonte: Autoria própria.

A geração de energia eólica é apresentada na Figura 32, considerando que a velocidade do vento na região na maior parte do período fica abaixo de 3 m/s e que o aerogerador escolhido começa a gerar a partir de 3 m/s, a energia eólica obtida não é significativa quando comparada a geração fotovoltaica. Como é possível observar através da curva de geração, o somatório de geração eólica para os 4 aerogeradores neste dia não ultrapassa 500 kW. Contudo, a área requerida para instalação dos módulos fotovoltaicos chega a 4.860 m², enquanto que para os 4 aerogeradores é necessário uma área de aproximadamente 600 m², considerando que a distância entre eles deve ser de 8 vezes o diâmetro do rotor e 150 m de distância dos obstáculos.

Figura 32- Velocidade do vento e energia eólica gerada.

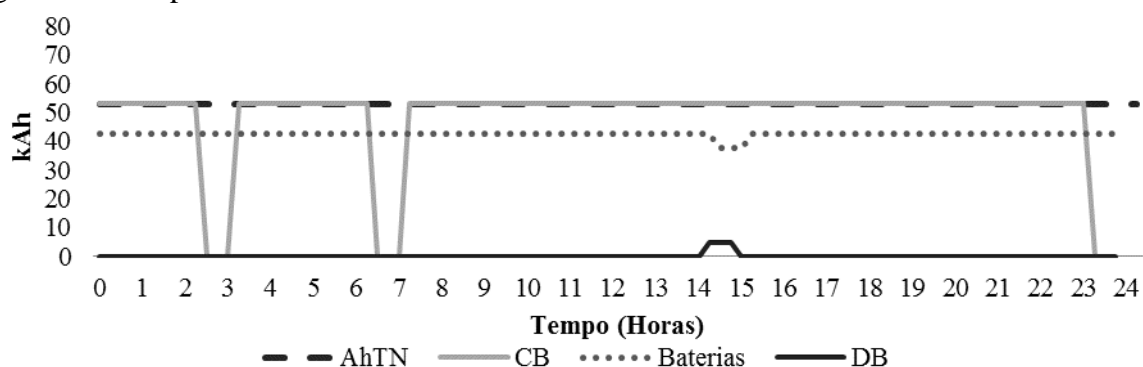


Fonte: Autoria própria.

O próximo submódulo a ser apresentado é o de armazenamento de energia. As principais variáveis envolvidas são carga e descarga das baterias e quantidade total de ampère-hora (Ah) necessários para atender a potência de armazenagem requerida de 1 MW. Tendo em vista as características técnicas da bateria escolhida para a simulação e a partir dos cálculos descritos

na seção 5 foi possível obter a quantidade de 53.150 Ah necessários para a armazenagem de 1 MW de potência, totalizando 28 baterias em paralelo para atingir essa capacidade e 12 baterias em série para manter a tensão do sistema. Dessa forma, o estado mínimo da carga nas baterias deve ficar em 121.260 Ah e o estado máximo de carga em 42.520 Ah. Na Figura 33 é possível observar as curvas obtidas para esses parâmetros.

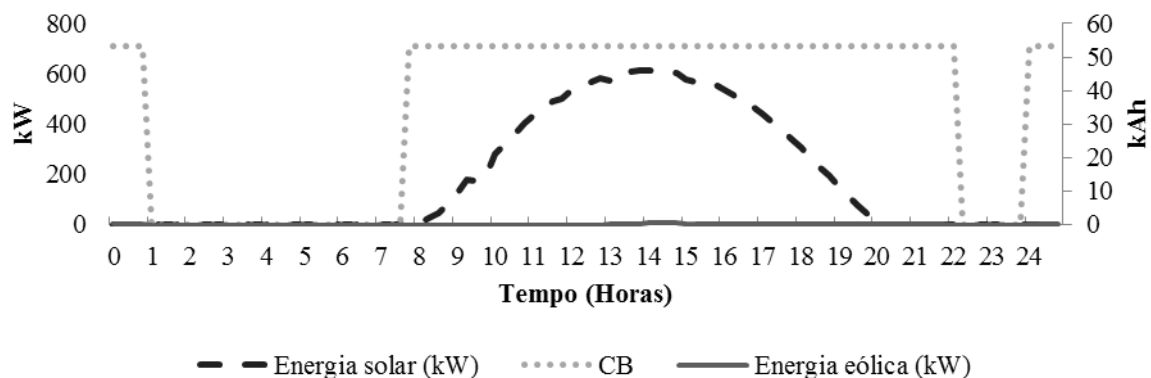
Figura 33- Comportamento das variáveis no submódulo das baterias.



Fonte: Autoria própria.

Considerando que o modelo está direcionado a autonomia energética, ou seja, sem depender da rede da concessionária, a carga das baterias (*CB*) depende da disponibilidade de geração proveniente dos recursos intermitentes, como mostra a Figura 34. Já a descarga das baterias depende da curva de descarga de cada bateria que é dada em função da corrente de descarga. A corrente de descarga é obtida conforme a potência entregue pelas baterias e a tensão da bateria.

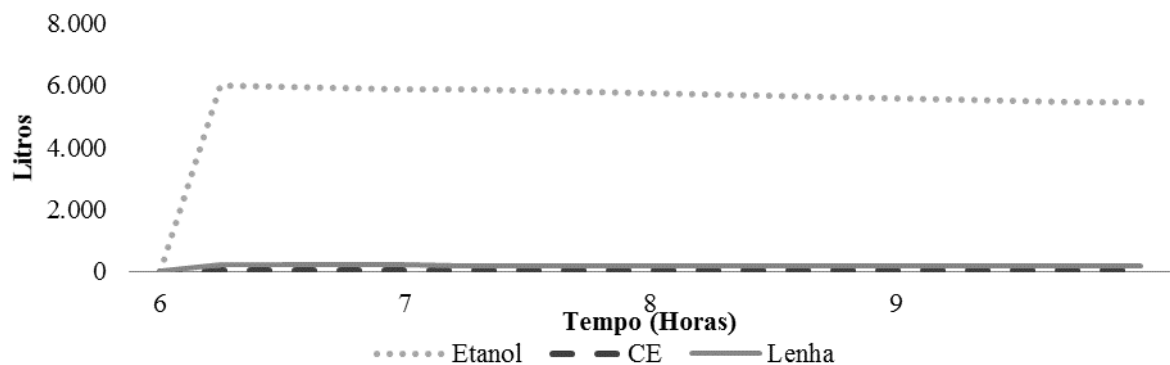
Figura 34- Carregamento das baterias.



Fonte: Autoria própria.

O submódulo biocombustíveis está dividido em geração por etanol e por biodiesel, a potência utilizada para os geradores é condizente com a potência disponível de geração de *backup* no campus. A série de dados de entrada no modelo tem início as 6 horas da manhã, desta forma, para uma melhor visualização dos dados, as curvas do submódulo biocombustíveis são apresentadas para as 4 primeiras horas de simulação. A geração de energia é condicionada pela disponibilidade de combustível, sendo que o volume de etanol varia de acordo com a quantidade de matéria-prima e de lenha, como apresentado na Figura 35. O consumo de etanol para gerar 635 kVA durante 15 minutos é 37,5 litros.

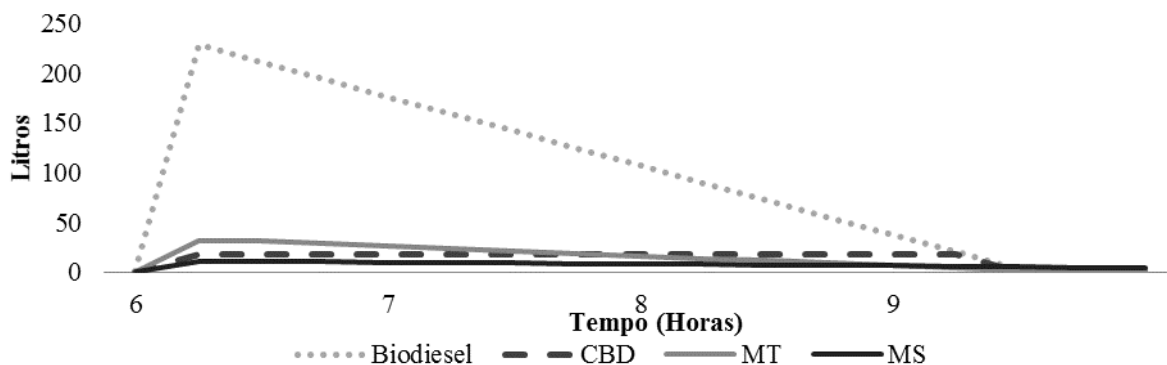
Figura 35- Disponibilidade de etanol.



Fonte: Autoria própria.

A variável biodiesel está condicionada aos insumos para sua produção como, metilato de sódio e metanol. Na Figura 36 é possível observar a disponibilidade do biodiesel, dos insumos e também o consumo do combustível. Conforme o consumo de biodiesel aumenta, a quantidade de biodiesel armazenado diminui, bem como a quantidade dos insumos utilizados na produção. O consumo é obtido em função da quantidade de energia gerada, dessa forma, e considerando que o consumo para gerar 635 kVA a cada 15 minutos é de 17,4 litros, o reservatório de biodiesel leva em torno de três horas e meia para esvaziar completamente, tendo em vista que o total produzido por mês é de 228 litros.

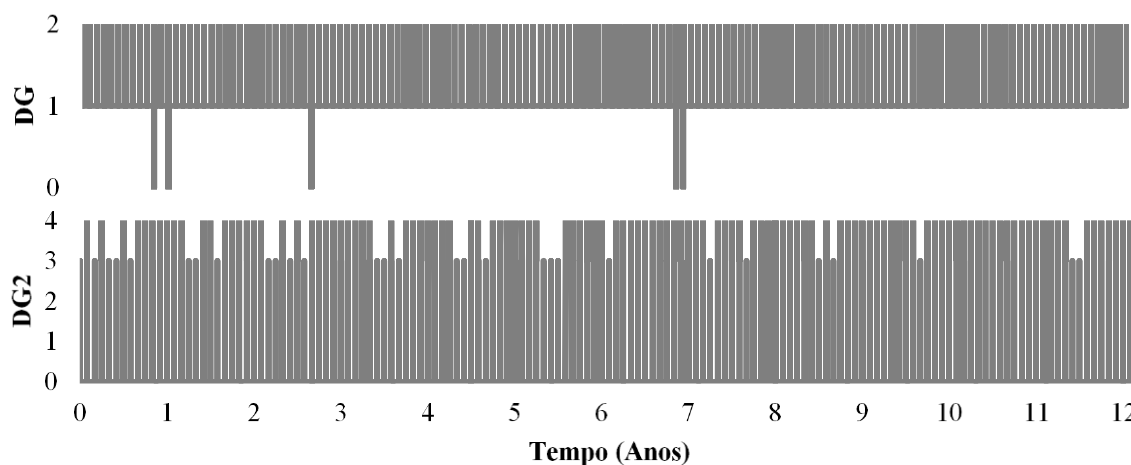
Figura 36- Disponibilidade de biodiesel.



Fonte: Autoria própria.

A definição do tipo de combustível que será utilizado para geração de energia é dado em função do custo e da sua disponibilidade. A dois parâmetros que determinam o combustível a ser utilizado, o *DG* que é a primeira ordem de despacho e, caso a demanda não tenha sido suprida, o segundo combustível é acionado por meio do *DG2*, como mostra a Figura 37.

Figura 37- Ordem de despacho geradores a biocombustíveis.

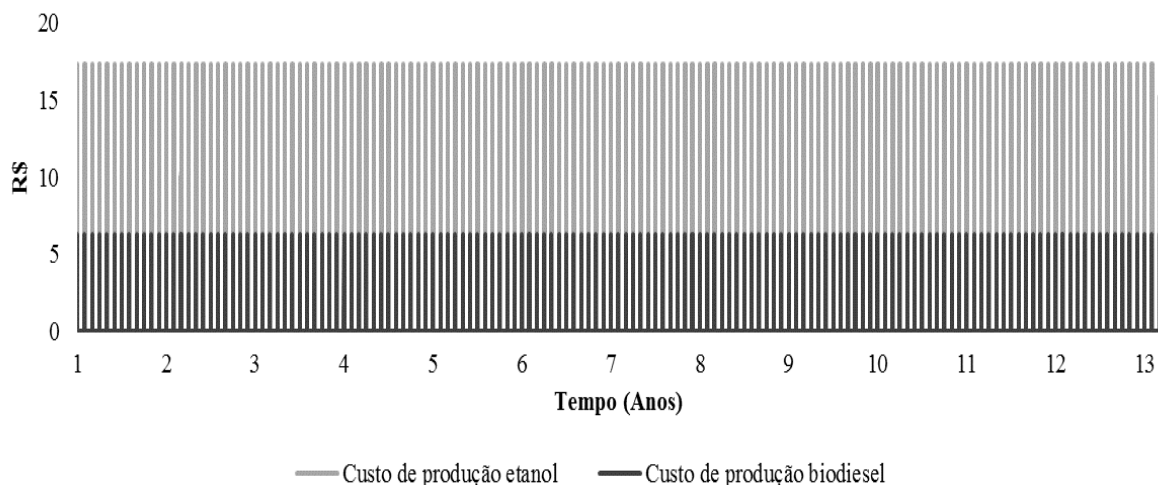


Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 38, a prioridade de utilização do combustível é o biodiesel, devido ao custo de produção mais baixo (Figura 38). Entretanto, devido à pouca disponibilidade desse combustível, não é possível suprir a necessidade de demanda somente com o biodiesel. Dessa forma é necessário que o gerador a etanol também entre em operação. O custo de produção de etanol e biodiesel ficam em R\$ 17,30 e R\$ 6,34 respectivamente, para uma produção de 635kVA de potência, ou seja, o custo por litro é de R\$ 0,46 para o etanol e R\$ 0,36 para o

biodiesel. Neste cenário a potência dos geradores permanece a mesma e a geração é constante, dessa forma os custos permanecem invariante ao longo do período de simulação.

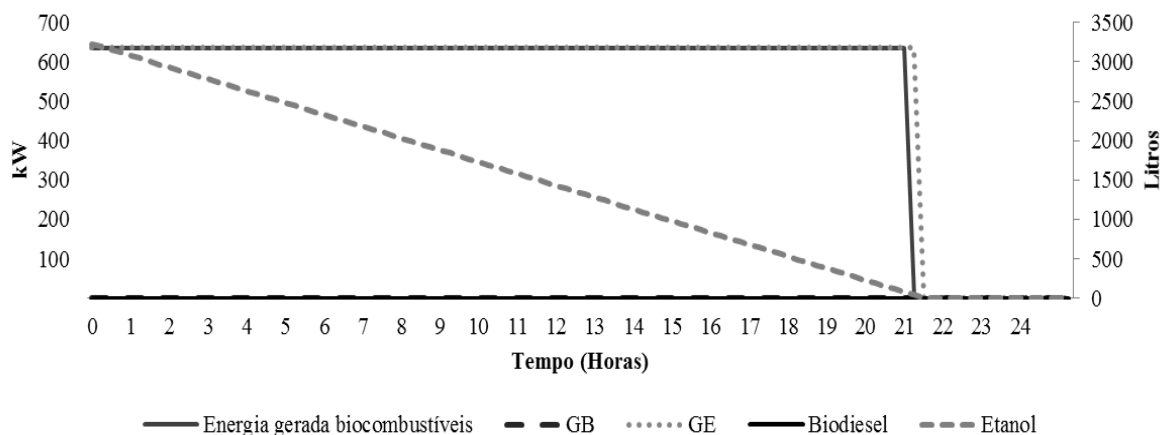
Figura 38- Custo de produção dos combustíveis.



Fonte: Autoria própria.

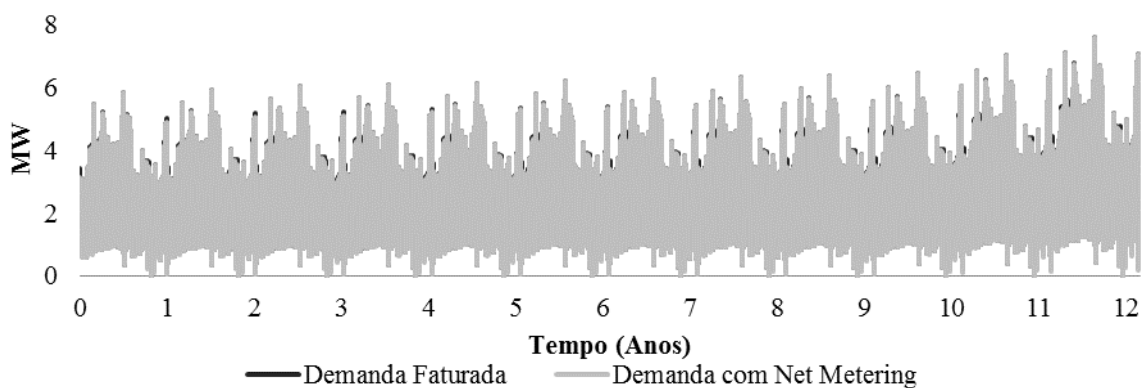
Na Figura 39 são apresentadas as curvas de geração dos biocombustíveis e a disponibilidade destes. Para o período exposto, não há disponibilidade de biodiesel, dessa forma a geração é somente por etanol, contudo às 21 horas o reservatório de etanol esvazia completamente ocasionando a falta de geração via biocombustíveis.

Figura 39- Geração de energia por biocombustíveis.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 40 são apresentadas as curvas de demanda faturada e demanda com *Net Metering*, para este caso a demanda entregue a rede não apresentou valores significativos, ficando em torno de 170 kW mensais.

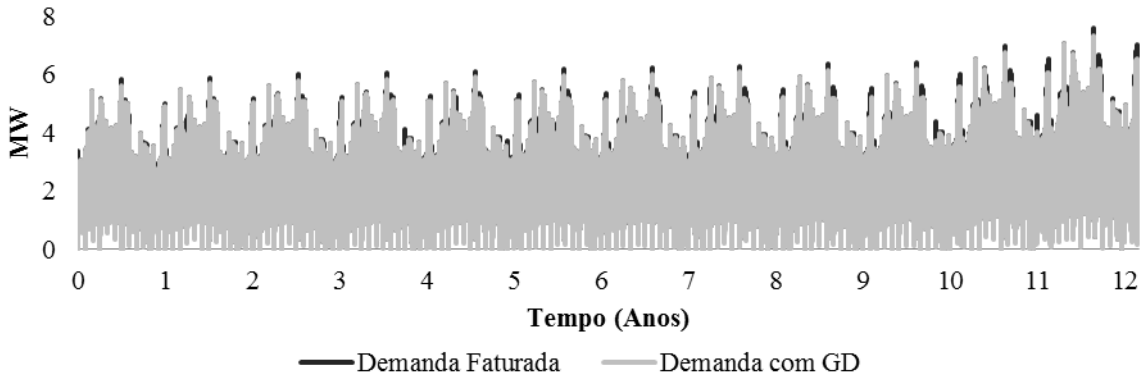
Figura 40 -Demanda com *Net Metering*.

Fonte: Autoria própria.

Baseado na demanda fornecida pela concessionária e nas gerações fotovoltaica, eólica e por biocombustíveis pode-se obter a demanda após a inserção da GD, como mostra a Figura 41. Os pontos de maior redução representam os períodos com maior geração. Quando o somatório das gerações alternativas não são suficientes para suprir a demanda e não há demanda a ser entregue pela via *Net Metering*, as baterias são descarregadas, contudo considerando que

o tempo de autonomia determinado é de apenas 30 minutos, não é possível obter uma redução completa em todos os pontos.

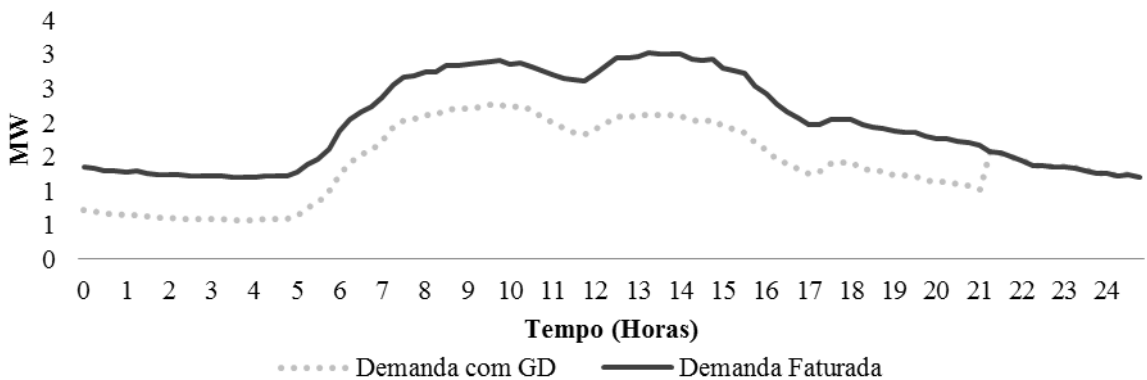
Figura 41- Demanda faturada e após a inserção da GD.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 apresenta as curvas de demanda para um dia. O dia considerado é o mesmo apresentado na Figura 35, assim a redução de demanda é significativa, baseado no fato de que o período possui geração fotovoltaica alta. Além disso, a curva de demanda com GD acompanha o carregamento e descarregamento das baterias. A partir das 22 horas, as curvas se sobrepõem por não haver geração alternativa para carregar as baterias e nem fornecer energia ao sistema. Além disso, não há geração por biocombustíveis devido à falta destes.

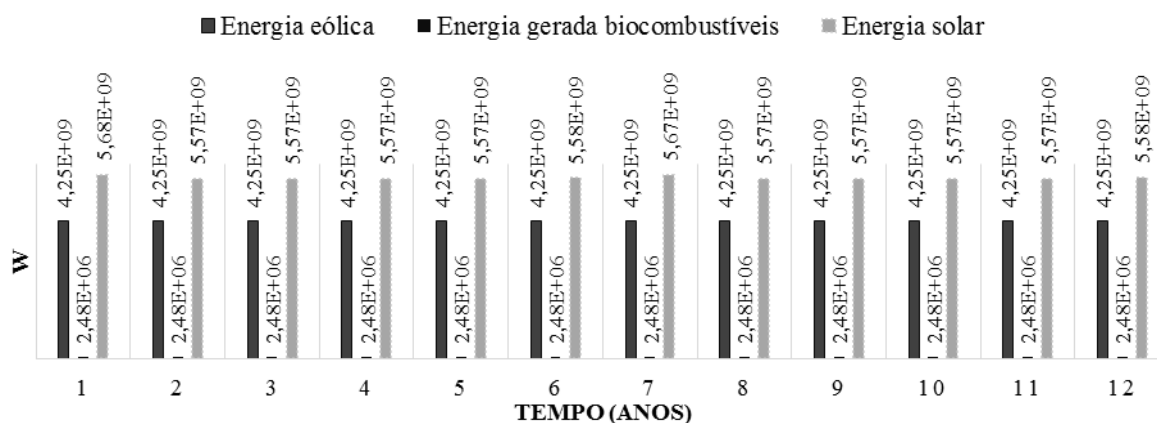
Figura 42- Redução da demanda para um dia.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 apresenta o somatório anual da geração de energia por fonte, considerando que a expansão é realizada de forma determinística e que nesse caso não foram inseridas condições de expansão no sistema, o somatório permanece igual em todo o período de simulação. Para este cenário a fonte que mais contribui para a redução da demanda contratada é a fotovoltaica, seguida pela eólica e biocombustíveis.

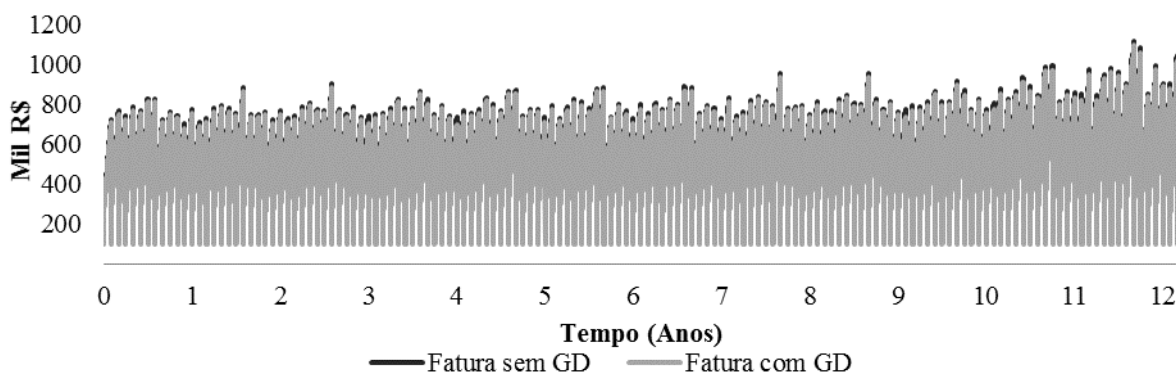
Figura 43- Somatório de geração ao longo dos anos.



Fonte: Autoria própria.

O valor em reais das faturas de energia com e sem GD é apresentado na Figura 44. Apesar da curva de demanda com GD apresentar apenas alguns vales de redução, o impacto dessas reduções na fatura de energia é bastante significativo.

Figura 44- Faturas com e sem GD.

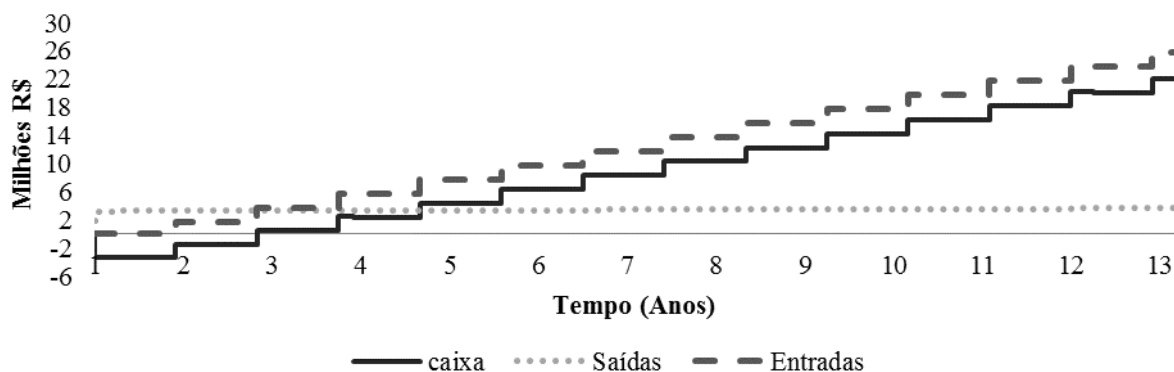


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 45 estão expostas as curvas de entradas, correspondente ao valor total economizado por ano nas faturas, as saídas que representam o somatório dos custos com

investimento e insumos energéticos utilizados para a geração de energia, e o fluxo de caixa, determinado pela diferença anual entre entradas e saídas.

Figura 45- Fluxo de caixa.



Fonte: Autoria própria.

Até o terceiro ano de simulação o caixa é negativo, devido ao fato das saídas serem maiores que as entradas considerando o investimento para compra dos aerogeradores, módulos fotovoltaicos, inversores e baterias. A partir do terceiro ano, o caixa é positivo e ao final dos doze anos é possível economizar mais de dezoito milhões de reais.

5.3.3 Aplicação de cenários

Após a apresentação do comportamento do modelo com base nos resultados das principais variáveis inseridas, são testados alguns cenários. Essa compreende a etapa de teste de políticas, ou seja, etapa 8 segundo (FORD, 1999). Os cenários são determinados em função dos dados apresentados na Tabela 16. As variáveis escolhidas para os testes foram ano de expansão de cada fonte, custo da matéria-prima para produção dos biocombustíveis, quantidade disponível de matéria-prima e crescimento de demanda. Essas variáveis foram determinadas em função do teste de sensibilidade do modelo. Além desses parâmetros diversos outros podem ser modificados a fim de analisar o impacto no modelo.

Tabela 16- Cenários.

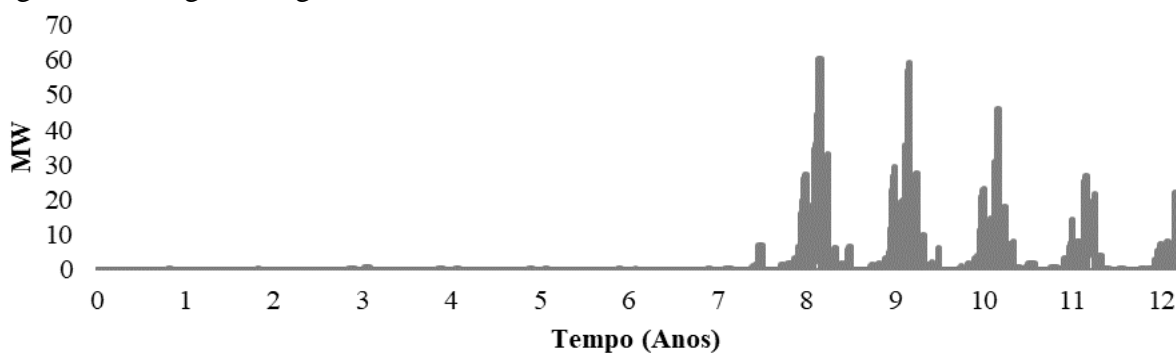
| Cenário | Expansão (Ano) | | | | Custo matéria-prima (R\$) | | Combustível | Demanda (%) |
|---------|----------------|----------|--------|-----------------|---------------------------|-----------|-------------|-------------|
| | Fotovoltaica | Baterias | Eólica | Biocombustíveis | Etanol | Biodiesel | | |
| 1 | 3 e 8 | 6 | 9 | 5 | 0 | 0 | Limitada | 2 |
| 2 | 3 e 8 | 0 | 9 | 5 | 0 | 0 | Ilimitada | 0 |
| 6 | 3 e 8 | 0 | 9 | 5 | 2,80 | 1 | Limitada | 5 |
| 7 | 3 e 8 | 6 | 9 | 0 | 2,80 | 1 | Ilimitada | 5 |

Fonte: Autoria própria.

A seguir serão apresentados os principais resultados obtidos com a inserção dos valores expostos na Tabela 16. As variáveis apresentadas são curva de demanda e fatura com a incorporação da geração distribuída, geração anual total por fonte e fluxo de caixa.

Para o cenário 1 são apresentados também os gráficos de energia entregue a rede e demanda com *Net Metering*. Na Figura 46 é apresentado o somatório do excesso de geração entregue a rede. Esses valores dependem das fontes solar e eólica. Embora exista um aumento na geração dessas fontes o valor acumulado é reduzido, tendo em vista o crescimento anual de demanda de 2 %. O valor entregue passa a ser significativo a partir do oitavo ano que é quando acontece a maior expansão de energia solar.

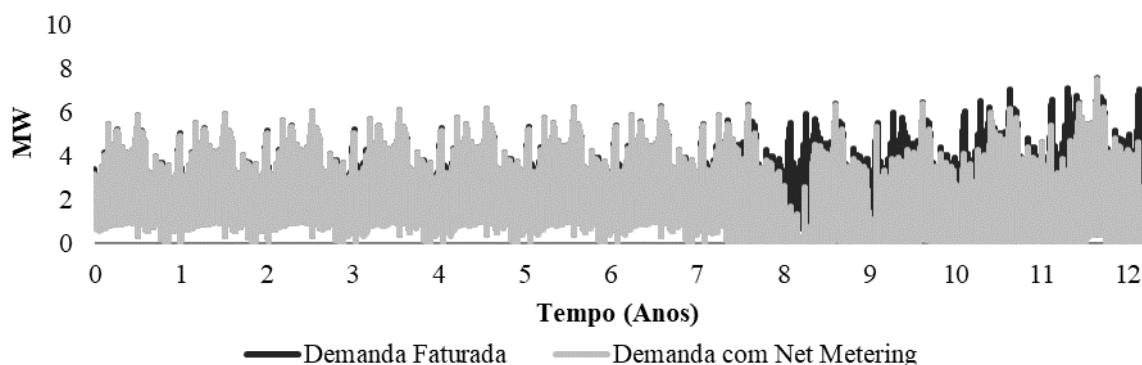
Figura 46-Energia entregue a rede cenário 1.



Fonte: Autoria própria

Na figura 47 são expostas as curvas de demanda faturada e demanda com *Net Metering*, a partir dela é possível observar que quando aumenta a energia entregue a rede, reduz a demanda faturada, com um atraso de 30 dias que foi o período definido para a utilização dessa energia.

Figura 47- Demanda com Net Metering para o cenário 1.

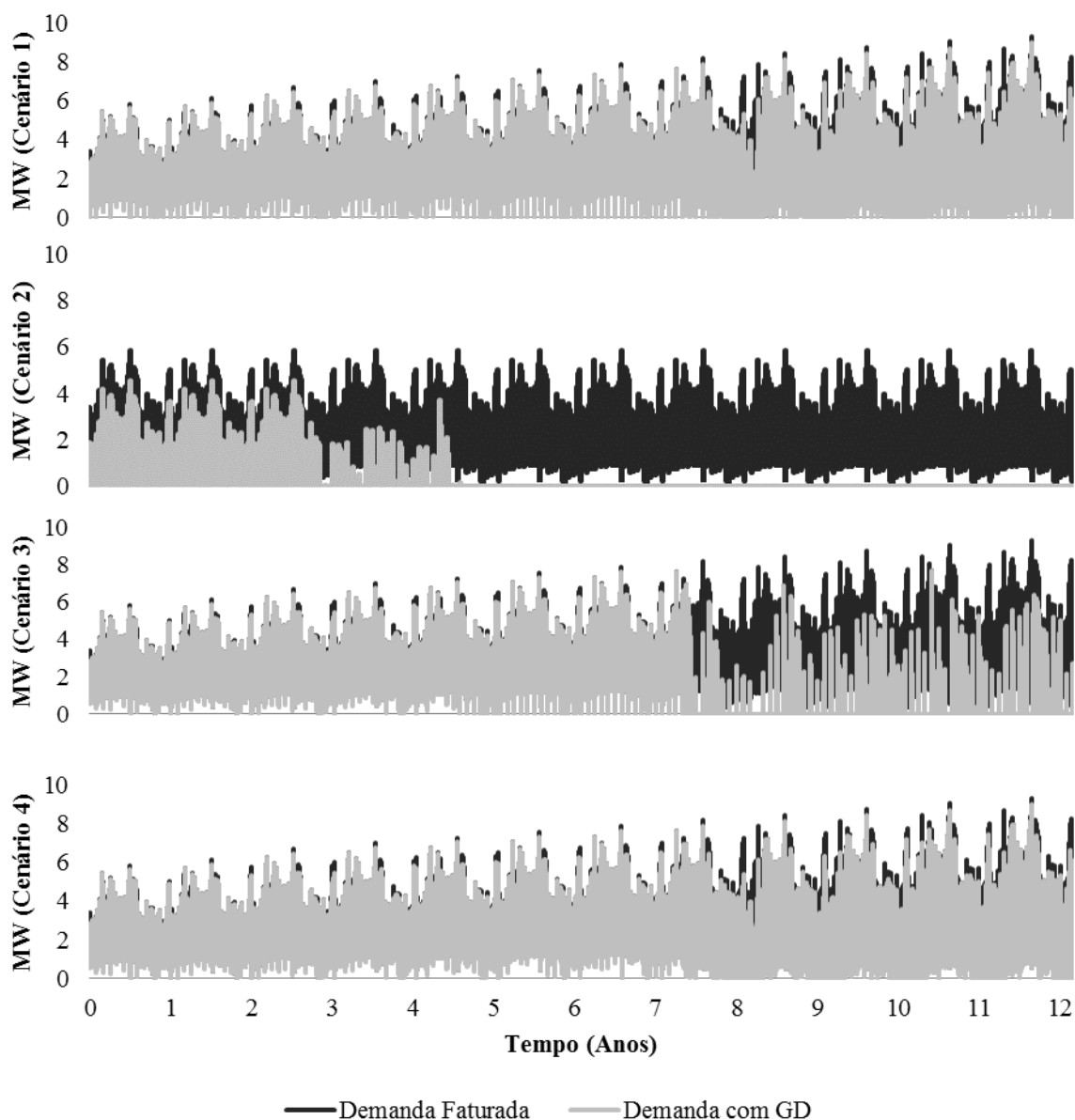


Fonte: Autoria própria

Um dos fatores que mais contribui para a redução da demanda é o *Net Metering*, pois dessa forma é possível aproveitar o excesso de geração quando a demanda está reduzida. Assim a rede se comporta como um armazenador dessa energia.

Na figura 48 pode-se observar a demanda faturada e a demanda com a inserção da GD para os quatro cenários analisados. Para o cenário 1 a maior redução é obtida com a expansão da geração solar no ano 8. Já para o cenário 2, a demanda contratada pela concessionária sofre uma grande redução a partir do ano 3 com a expansão solar, contudo, torna-se zero a partir da expansão dos biocombustíveis, considerando que o fornecimento de matéria-prima para a produção dos biocombustíveis é ilimitada. que para os dois primeiros cenários as curvas de demanda fornecida pela concessionária e demanda com GD permanecem semelhantes, devido ao fato de que a principal variação ocorre na expansão da potência dos geradores a biocombustíveis. Entretanto, apesar do aumento de potência no ano 5, a quantidade de combustível permanece igual, dessa forma não há aumento significativo na geração. No cenário três é possível observar uma redução expressiva na curva de demanda com a expansão das fontes solar e eólica e das baterias, nesse cenário o número de módulos passa de 3.000 para 9.005, 15.114 e 21.877. Já o número de aerogeradores passa de 4 para 473 e por último 917 unidades. A potência das baterias sofre um incremento de 1 MW para 1,2 MW. A partir do cenário 3, onde a quantidade de matéria-prima se torna ilimitada, eliminando essa restrição na geração de biocombustíveis, a curva de demanda é modificada. Quando a geração por biocombustíveis cresce, o custo com insumos consequentemente aumenta, o que ocasiona novamente o aumento na dependência de energia da concessionária.

Figura 48- Comparativo entre demanda faturada e demanda com GD.



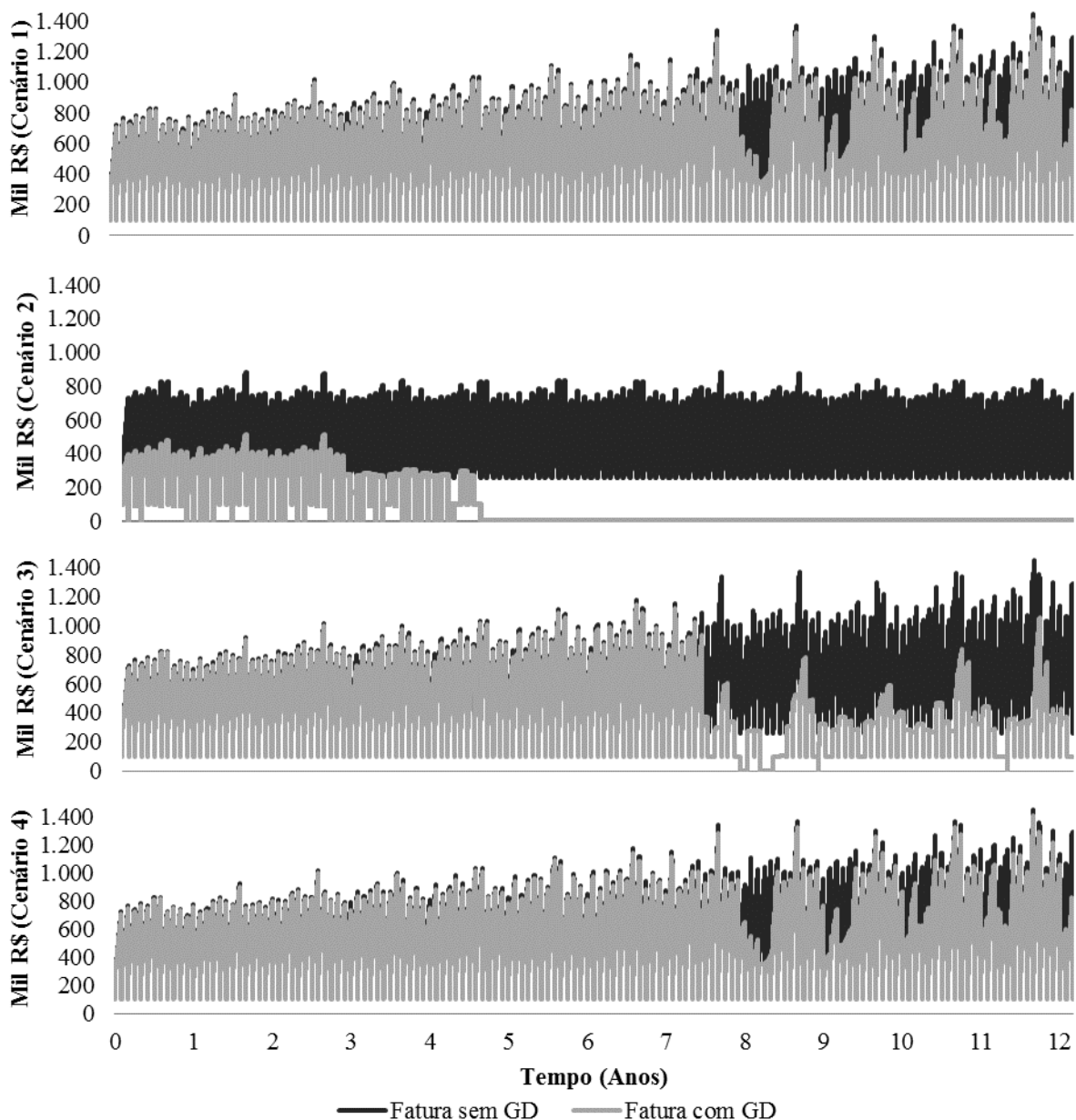
Fonte: Autoria própria.

Embora a redução nas curvas de demanda não seja vultosa, quando analisamos as curvas de fatura, essa redução passa a ser mais expressiva. As curvas comparativas entre a fatura com sem a GD são apresentadas na Figura 49. Para os cenários 1, 2 e 3 há um decréscimo na fatura na medida em que as fontes de geração são ampliadas. Já para os cenários 4 a demanda com GD é menor nos anos que antecedem a expansão dos biocombustíveis, considerando os custos dessa expansão. Com o valor economizado até o quinto ano é possível adquirir 88 novos

geradores com potência de 635 kVA, contudo isso acarretaria um excesso de potência instantânea no sistema, além de tornar o fluxo de caixa negativo e inviabilizar o suprimento do custo operacional, dessa forma, para o cenários 5, a potência de expansão foi limitada em 6 MW para cada combustível, tendo em vista os picos de demanda.

No cenário 4, essa restrição de expansão não foi aplicada, dessa forma as saídas serão sempre maior do que das entradas, tendo em vista o custo de operação do sistema, no qual estão incluídos o custo dos insumos e da matéria-prima para produção dos combustíveis. Para produzir a quantidade de biodiesel gasto na geração de 635 kW durante 15 minutos é necessário aproximadamente R\$ 24 e para produzir a mesma quantidade de energia com etanol é gasto em torno de R\$ 18, esses valores crescem na medida em que a geração por biocombustíveis é expandida. No cenário 5 é possível suprir totalmente a demanda somente com as fontes de GD inseridas, acarretando que a fatura zere, contudo, o custo operacional do sistema aumenta.

Figura 49- Comparativo entre as faturas com e sem GD.

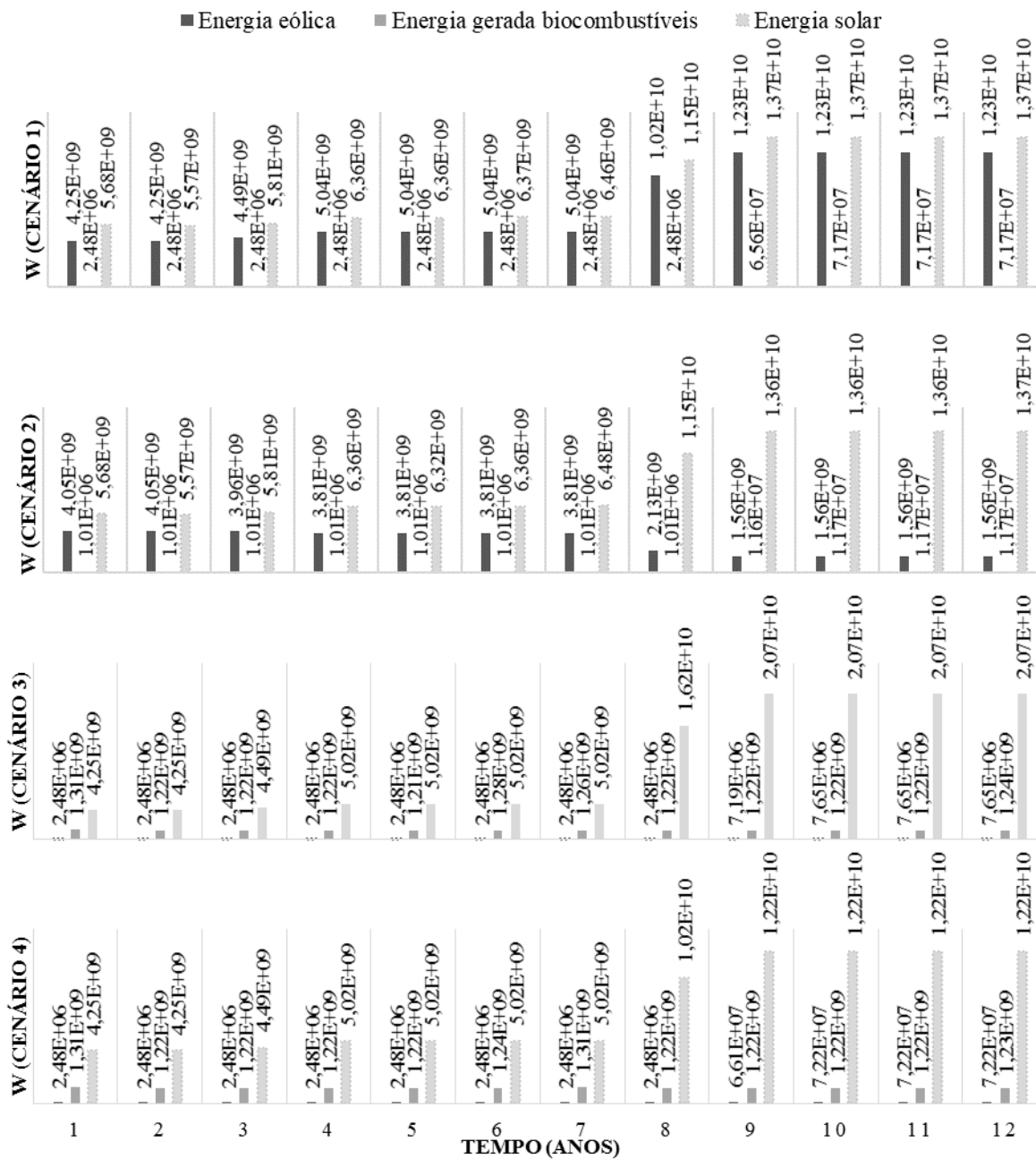


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 50 é apresentado o somatório dos valores de geração de energia por fonte ao longo dos anos. É possível observar que os valores crescem na medida em que as fontes são ampliadas. No cenário 1 a predominância são as gerações fotovoltaica e eólica, pois não há expansão dos biocombustíveis. Já no cenário 2 existe a predominância fotovoltaica seguida pelos biocombustíveis. A partir do cenário 3, a quantidade de matéria-prima para produção dos biocombustíveis passa a ser ilimitada, o que propicia o crescimento dessa geração. O cenário 4 apresenta um pico de geração por meio dos biocombustíveis no quinto ano, em que a potência

dos geradores chega a mais de 20 MW, contudo, devido ao fato de que o fluxo de caixa passa a ser negativo e que o custo operacional supera o valor das entradas, não há como manter a geração alta nos próximos anos. Esse fator foi corrigido no cenário 5, onde a expansão foi limitada em 6 MW para cada tipo de combustível.

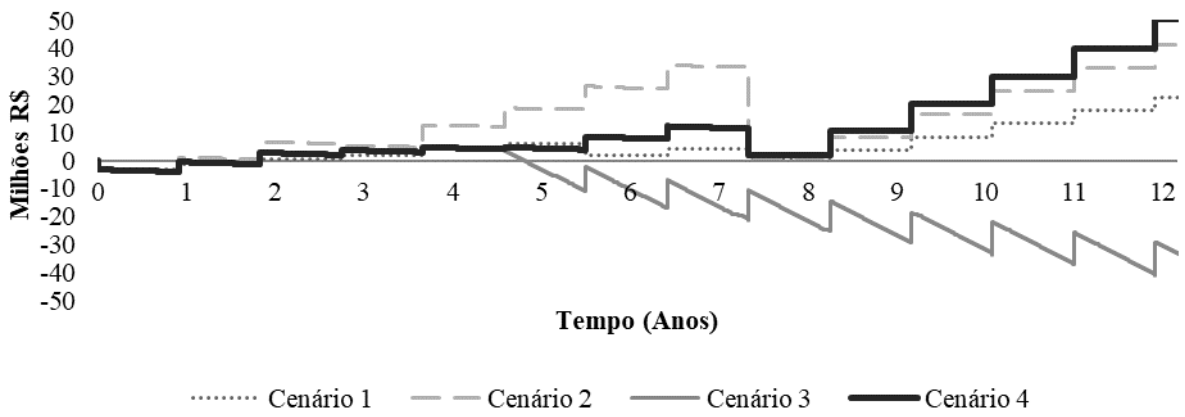
Figura 50- Total gerado por ano para os cinco cenários.



Fonte: Autoria própria.

Outra variável analisada é o fluxo de caixa, como apresentado na Figura 51. Os únicos cenários em que o fluxo de caixa passa a ser negativo são o 4 e 5, devido a grande expansão da potência dos geradores a biocombustível, sendo que no cenário 4 o custo de operação para manter o acionamento dos geradores é muito elevado, dessa forma nos últimos anos o fluxo de caixa começa a ficar negativo, dessa forma seria mais viável investir na expansão das baterias, pois o período que mais utiliza esse tipo de fonte é durante o intervalo em que não há energia fotovoltaica e nem eólica.

Figura 51- Fluxo de caixa.



Fonte: Autoria própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais conclusões, bem como as contribuições do trabalho apresentado. Além disso, são propostas algumas alternativas de melhorias no modelo como sugestões para futuros trabalhos.

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo para verificação da viabilidade econômica da inserção de recursos energéticos distribuídos, com ênfase no gerenciamento de demanda. O modelo pode ser aplicado nos mais distintos lugares e os recursos podem ser modelados de acordo com a disponibilidade do local.

A utilização da técnica de Dinâmica de Sistemas permite a realimentação do sistema e a inserção de novos parâmetros com facilidade, além da obtenção do comportamento do modelo frente a esses novos parâmetros. Dessa forma, foi possível a aplicação de cenários para obter a melhor configuração de despacho das fontes, bem como em que momento essas fontes deveriam ser expandidas. A partir de variáveis de entrada como disponibilidade de recursos e curva de demanda é possível obter qual o benefício econômico da instalação de fontes de geração distribuída.

O impacto na demanda medida é obtido com base na quantidade de energia gerada por cada fonte. Além disso, o acompanhamento do fluxo de caixa permite verificar qual o melhor período para expandir as fontes de geração e armazenamento do sistema. Além de comprovar o comportamento satisfatório do modelo frente ao modo de referência, o estudo de caso possibilitou a comprovação de que seria vantajoso do ponto de vista econômico para a Universidade Federal de Santa Maria a instalação de pontos de geração distribuída na rede.

De acordo com os cenários apresentados, a melhor alternativa seria a diversificação dos recursos, embora as fontes solar e eólica não possuam custo operacional, são necessárias outras fontes que supram a demanda nos horários em que não há geração fotovoltaica, como é o caso dos biocombustíveis. As baterias também são uma alternativa, entretanto, para que o sistema se torne autossuficiente seria necessário um grande número de baterias e, devido ao fato de que no local há pouca geração eólica e a geração fotovoltaica é somente no período do dia, seria

necessário um grande número de módulos para suprir a demanda no período diurno e ainda armazenar energia para o período sem incidência de radiação solar direta.

Apesar do cenário 3 apresentar uma economia significativa na fatura de energia, o melhor resultado foi obtido com o cenário 5, em que foram inseridos geradores a biocombustíveis, no caso biodiesel e etanol. Nessa hipótese é possível deixar de contratar energia da concessionária, admitindo somente os custos de operação do sistema.

A principal contribuição do trabalho é apresentar um modelo de integração de recursos que pode ser aplicado em diversos locais. O modelo contribui para difusão das microrredes, tendo em vista que apresenta os aspectos financeiros de forma completa, com os custos de investimento e custos operativos do sistema. Além da possibilidade de inserção de novas variáveis de acordo com a necessidade do ambiente analisado.

6.2 OPORTUNIDADE DE TRABALHOS FUTUROS

A análise econômica da implantação de microrredes depende de diversos fatores e necessita de uma metodologia que permita a mais completa análise, dessa forma, a partir do presente trabalho é possível:

- Inserir novos parâmetros que podem impactar diretamente nos aspectos financeiros, como, políticas de incentivo governamentais;
- Ajustar o modelo para que a demanda contratada seja otimizada de acordo com os novos recursos de geração, assim como otimizar quando o sistema será expandido e que fontes devem ser consideradas;
- Modelar outros recursos de armazenamento, além do gerenciamento dos veículos elétricos como consumidor e também como fornecedor de energia.

REFERÊNCIAS

ALAMRI, B. R.; ALAMRI, A. R. Technical Review of Energy Storage Technologies when Integrated with Intermittent Renewable Energy. **International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**, p. 1–5, 2009.

ALVES, A. A. F. **Construção de cenários de demanda no setor residencial-Uma abordagem baseada em Dinâmica de Sistemas**. p.121. Dissertação de mestrado. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

ALVES, C. B. A. **Net metering : definição de metodologia e estudo de caso**. p.126. Dissertação de mestrado. Lisboa, Portugal: Universidade Nova de Lisboa, 2014.

ANEEL. Energia eólica. In: **Atlas Energia Elétrica do Brasil**. 2ª edição ed. Brasília: [s.n.]. p. 93–110.

ANEEL. Resolução Normativa N° 414 de 9 de setembro de 2010. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, p. 205, 2010.

ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída. **Cadernos Temáticos ANEEL**, n. 2ªed., 2016.

ANEEL, 2016. **Geração Distribuída**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em Dezembro de 2016.

ANEEL, 2019. **Bandeiras tarifárias**. Disponível em:< http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdmFHRrE/content/aneel-atualiza-metodologia-de-acionamento-das-bandeiras-tarifarias/656877>. Acesso em Julho de 2019.

ANEEL, 2019. **Geração distribuída**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/>>. Acesso em Maio de 2019.

ASLANI, A.; HELO, P.; NAARANOJA, M. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. **Applied Energy**, v. 113, p. 758–765, 2014.

AZIZ, T. et al. **Integration of wind energy system in microgrid considering static and dynamic issues**. 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT). **Anais...**Bangladesh: IEEE, maio 2015Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7307479/>>

BASAK, P. et al. A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5545–5556, 2012.

BAUMGARTEN, C. **Modelo para análise da inserção de pequenas fontes solares fotovoltaicas em sistemas de distribuição: Uma abordagem multivariável**. 118 p. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

BERNAL, J. L. DE O. **Modelo de integração de recursos energéticos com consideração de delimitadores de potenciais de recursos energéticos visando o plano preferencial do planejamento integrado de recursos**. 145 p. Tese de doutorado. São Paulo, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.

BORDIN, G. **Um modelo para estudos da demanda de Energia elétrica em ambiente Competitivo**. 204 p. Tese de doutorado. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

BORGES, P. V. DE S. **Análise regulatória e econômica de microrredes elétricas no Brasil**. 137 p. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

BRANDÃO, D. et al. EXPERIMENTAL VALIDATION OF A FULLY-DISPATCHABLE MICROGRID WITH CENTRAL CONTROLLER. **Eletrônica de Potência**, v. 23, n. 3, p. 1–11, 1 jul. 2018.

BRENNA, M. et al. Simulation and optimization of integration of hybrid renewable energy sources and storages for remote communities electrification. **2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT-Europe 2017 - Proceedings**, v. 2018–Janua, p. 1–6, 2018.

BRITO, R. G. DE C. et al. Geração Distribuída no Brasil: panorama, barreiras e oportunidades. p. 7, 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, v. 16, p. 172, 2012.

CERQUEIRA, S. N.; SAAVEDRA, O. R. **Despacho econômico e ambiental em microrredes usando algoritmo de busca direta**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. **Anais...Natal, Rio Grande do Norte: 2015** Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/303689712%0ADespacho>>

COSTAMAGNA, P.; MAGISTRI, L.; MASSARDO, A. F. Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine. **Journal of Power Sources**, v. 96, n. 2, p. 352–368, 2001.

DA COSTA, Y. J. R. **Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**. 185 p. Tese de doutorado. Campina Grande, Paraíba: Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

DEGEILH, Y.; GROSS, G. Stochastic Simulation of Utility-Scale Storage Resources in

Power Systems with Integrated Renewable Resources. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 3, p. 1424–1434, 2015.

DEHDARIAN, A. Scenario-based System Dynamic Modeling for the Cost Recovery of New Energy Technology Deployment: The Case of Smart Metering Roll-out. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 791–803, 2017.

DIAS, M. V. X. **Geração distribuída no Brasil : oportunidades e barreiras**. 143 p. Dissertação de mestrado. Itajubá, Minas Gerais: Universidade Federal de Itajubá, 2005.

DONG, J. et al. Storage-Reserve Sizing with Qualified Reliability for Connected High Renewable Penetration Micro-Grid. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 7, n. 2, p. 732–743, 2016.

EMMEL, S. G. et al. Transformação de bebidas e perfumes apreendidos pela receita federal de Santa Maria em álcool combustível na usina piloto de etanols do colégio politécnico da UFSM. **XXX Jornada Acadêmica Integrada**, p. 1, 2015.

FAISAL, M. et al. Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications : Issues and Challenges. **IEEE Access**, v. 6, p. 35143–35164, 2018.

FALCÃO, D. M. Smart Grids E Microredes : O Futuro Já É Presente. **VIII Simpase**, p. 1–11, 2009.

FANTINEL, A. L. **Análise da produção de biodiesel em pequena unidade de processamento empregando óleos residuais como matéria-prima**. 98 p. Dissertação de mestrado. Santa Maria, Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

FLORENTÍN, C. M. C. **Operação de sistemas hidroelétricos em ambiente competitivo: Uma abordagem da gestão empresarial via simulação estocástica e dinâmica de sistemas**. 269 p. Tese de doutorado. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

FORD, A. **Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems**. [s.l: s.n.].

FUGIMOTO, S. K. **Estrutura de tarifas de energia elétrica análise crítica e proposições metodológicas**. 207 p. Tese de doutorado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

GEORGILAKIS, P. S.; HATZIARGYRIOU, N. D. Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks : Models , Methods , and Future Research. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 3, p. 3420–3428, 2013.

GRISALES, L. F. et al. Optimal Planning and Operation of Distribution Systems Considering Distributed Energy Resources and Automatic Reclosers. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 1, p. 126–134, 2018.

GUO, F.; WEN, C.; MAO, J. Distributed Economic Dispatch for Smart Grids With Random Wind Power. v. 7, n. 3, p. 1572–1583, 2016.

HAHN, H.; MEYER-NIEBERG, S.; PICKL, S. Electric load forecasting methods : Tools for decision making. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 902–907, 2009.

HATZIARGYRIOU, N. D. et al. Quantification of economic, environmental and operational benefits of microgrids. **2009 IEEE Bucharest PowerTech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid of the Future**, p. 1–8, 2009.

HE, Y. X. et al. The optimization of Chinese power grid investment based on transmission and distribution tariff policy: A system dynamics approach. **Energy Policy**, v. 113, n. November 2017, p. 112–122, 2018.

HETZER, J.; YU, D. C.; BHATTARAI, K. An economic dispatch model incorporating wind power. v. 23, n. 2, p. 603–611, 2008.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids : A review of technologies , key drivers , and outstanding issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, n. September 2017, p. 402–411, 2018.

HSU, C. W. Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. **Applied Energy**, v. 100, p. 205–217, 2012.

JIANG, B.; FEI, Y. Smart home in smart microgrid: A cost-effective energy ecosystem with intelligent hierarchical agents. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 1, p. 3–13, 2015.

JURADO, F.; ORTEGA, M.; CANO, A. Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant. **Electric Power Systems Research**, v. 60, n. 3, p. 123–135, 2002.

KHODAEI, A.; BAHRAMIRAD, S.; SHAHIDEHPOUR, M. Microgrid Planning Under Uncertainty. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 5, p. 2417–2425, 2015.

KUMAWAT, M. et al. Optimal distributed generation placement in power distributed networks: A review. **2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)**, p. 1–6, 2015.

L. C. DE GODOI, R. C. LOTERO, M. T. A. O Contexto Regulatório para a Geração de Pequeno Porte no Brasil. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2014.

LANDEIRA, J. L. F. **Análise técnico-econômica sobre a viabilidade de implantação de sistemas de geração fotovoltaica distribuída no Brasil**. 152 p. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

LIU, X. et al. How might China achieve its 2020 emissions target? A scenario analysis of energy consumption and CO₂ emissions using the system dynamics model. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 401–410, 2015.

MARTÍNEZ, J. **Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão**. 216 p. Dissertação de mestrado. Itajubá, Minas Gerais: Universidade Federal de Itajubá, 2009.

OLIVEIRA, M. A. DE. O impacto do ICMS na Geração Distribuída no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 3, p. 407–417, 2016.

ORTEGOSA, C. ZATORRE. **Metodologia para estudos da viabilidade econômico-financeira no uso do gás natural em instalações prediais residenciais: uma abordagem via Dinâmica de Sistemas**. 122 p. Dissertação de mestrado. Campo Grande, Mato Grosso do Sul: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2006.

PIRES, J. C. L.; PICCININI, M. S. Modelos de Regulação Tarifária do Setor Elétrico. **Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social- BNDES**, p. 1–32, 1998.

POULLIKKAS, A. A review of net metering mechanism for electricity renewable energy sources. **International Journal of Energy and Environment**, v. 4, n. 6, p. 975–1002, 2013.

RAHMAN, M. A. et al. Developing demand side management program for commercial customers: A case study. **2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)**, p. 1–6, 2016.

REN21. **Energias Renováveis 2016: Relatório da situação mundial**. p. 1–31, 2016.

Rolls Battery Engineering. Disponível em: < <http://www.rollsbattery.com/catalog/>>. Acesso em Julho de 2019.

RGE Sul, 2018. **Tarifas**. Disponível em: <<https://www.cpfempresas.com.br/institucional/tarifas.aspx?emp=D008>>. Acesso em: Outubro de 2018.

SAAVEDRA M., M. R.; CRISTIANO, C. H.; FRANCISCO, F. G. Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. June 2017, p. 247–259, 2018.

SANCHES, S. L. R. **Modelo Baseado em Dinamica de Sistemas para Demanda de Creditos de Carbono**. 129 p. Tese de doutorado. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio grande do Sul, 2013.

SANTOS, F. A. C. M. DOS; SANTOS, F. M. S. M. DOS. Geração distribuída versus centralizada. **Revista do Instituto Politécnico de Viseu n°**, v. 35, 2008.

SANTOS, L. L. C. DOS. **Projeção da difusão de sistemas fotovoltaicos em consumidores residenciais de baixa tensão**. 156 p. Tese de doutorado. Santa Maria, Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

SICA, E. T. **Planejamento Integrado de Recursos Hídricos para Geração de Energia Elétrica: um sistema de apoio à decisão via multicritério e dinâmica de sistemas**. 163 p. Tese de doutorado. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SIEBERT, L. C. et al. Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Redes Inteligentes Utilizando Algoritmos Genéticos. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1–6, 2012.

SILVA, H. B. DA. **Gestão Eficiente dos Novos Recursos Energéticos advindos das Redes Inteligentes**. 173 p. Tese de doutorado. Belo Horizonte, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

SILVEIRA, F. S. V. **Um modelo para planejamento econômico-financeiro de empresas de energia elétrica adequado ao ambiente competitivo**. 106 p. Dissertação de mestrado. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

SILVEIRA, F. S. V. **Modelo integrado para avaliação de projetos de investimento no setor elétrico**. 180 p. Tese de doutorado. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade federal de Santa Catarina, 2001.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. [s.l: s.n.].

STRASSER, T. et al. A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 4, p. 2424–2438, 2015.

STRBAC, G. Demand side management: Benefits and challenges. **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p. 4419–4426, 2008.

TAVARES, T. M. **Estudo de Modelos de Remuneração de Autoconsumo Fotovoltaico para Cabo Verde**. 101 p. Dissertação de mestrado. Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2016.

TOWNSEND, T. U. **a Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems**. [s.l: s.n.].

UDAETA, M. E. M. et al. Hierarchy of the Energy Resources Using Data Envelopment Analysis for Energy Planning. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 4, p. 1752–1757, 2016.

Wind Turbine Models. General electric 1.5 SL. Disponível em <<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/20-general-electric-ge-1.5sl>>. Acesso em Julho de 2019.

XIA, H. et al. Distributed Control Method for Economic Dispatch in Islanded Microgrids With Renewable Energy Sources. v. 6, 2018.

XIA, X.; ELAIW, A. M. Optimal dynamic economic dispatch of generation : A review. **Electric Power Systems Research**, v. 80, n. 8, p. 975–986, 2010.

ZHU, L. et al. Direct Load Control in Microgrids to Enhance the Performance of Integrated Resources Planning. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 5, p. 3553–3560, 2015.