UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

GUILHERME BARBOSA LEME

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UMA *MICROGRID*

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2019

GUILHERME BARBOSA LEME

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UMA *MICROGRID*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Dr. Marcos Roberto Bombacini
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TOLEDO
2019

Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica

TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 112

Modelagem e Simulação de uma *Microgrid*

por

Guilherme Barbosa Leme

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às **09h00 do dia 29 de novembro de 2019** como **requisito parcial** para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Eletrônica**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Dr. Cassius Rossi de Aguiar
UTFPR

Eng. Almir Augusto Braggio
FPTI - LASSE

Dr. Marcos Roberto Bombacini
UTFPR

Dr. Fábio Risental Coutinho
UTFPR

O termo de aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso

Toledo, 29 de novembro de 2019

Dedico esse trabalho à minha família que com tanto carinho caminhou comigo esta incrível jornada. Em especial minha esposa Ana, qual me mostrou que o amor é capaz de fazer-me crescer, encontrar e, hoje, graduar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UTFPR pelo incessante apoio ao longo dos anos, ao corpo docente que sempre se fez presente, ainda mais nesse momento tão crítico que é o final de um curso. Agradeço à coordenação pelo entendimento e apoio no processo da realização deste trabalho. Agradeço especialmente ao meu orientador, Dr. Marcos Roberto Bombacini pela ótima orientação que me foi concedida e todo apoio na produção deste trabalho. Agradeço também à banca, Dr. Cassius Rossi de Aguiar e Eng. Almir Augusto Braggio, por toda a experiência repassada e apoio na realização deste trabalho.

Agradeço à minha família, Luiz, Ana e Zara, por toda a paciência, apoio moral e carinho. Agradeço aos meus pais pela oportunidade concedida de estudar longe de minha cidade natal. Agradeço aos meus amigos, por todas as noites em que tive companhia ao escrever este trabalho. Especialmente, agradeço ao meu amigo Eric, que sempre foi um bom ouvido, um bom ombro e um bom braço direito. Agradeço à Maxicon Sistemas, pelo apoio fosse na flexibilização das horas de trabalho, ou no apoio moral.

Esta foi uma caminhada incrível, de muito autoconhecimento e superação. Agradeço a cada instante, cada segundo, cada derrota, cada vitória. Ensinamentos aqui aprendidos para sempre estarão marcados na minha vida, assim como as pessoas que fizeram estas experiências acontecer. Muito obrigado.

Se você consegue aguentar a dor da disciplina, você nunca terá que aguentar a dor da decepção (SABAN, Nick).

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso analisa o comportamento de uma *microgrid* durante um período de 24h através de simulações no software PowerWorld. A arquitetura da microgrid em questão permite avaliar os impactos na rede, no nível da unidade consumidora, do uso de *microgrids* para a distribuição de energia em diferentes modos de operação: convencional, geração distribuída e geração distribuída com apoio no horário de pico. Os resultados da simulação evidenciaram o comportamento da demanda e custo, através da modelagem e simulação de uma *microgrid*, baseando-se nas vigentes normativas da concessionária de energia COPEL, no estado do Paraná, provendo uma visão geral do impacto da adoção de *microgrids* na energia e economia regional.

Palavras-chave: *Microgrid*. Simulação. Gerenciamento de Energia. Geração Distribuída.

ABSTRACT

This final project work analyses the behaviour of a proposed *microgrid* during the period of 24 hours, thorugh a series of simulations using the software PowerWorld. The microgrid architecture allows the evaluation of the network impact, at the consumer level, about the use of *microgrids* with distributed energy in different operational conditions: conventional, distributed generation and distributed generation with peak hour support. The simulations show the demand and cost behaviour, according to the modeling and simulation based on the valid norms of the energy dealership COPEL, on the state of Paraná, providing a general vision of the impact on power and economic sides of the *microgrid* adoption.

Keywords: *Microgrid*. Simulation. Energy management. Distributed generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo entre a) modelo tradicional e b) modelo distribuído de energia 3
Figura 2 – Ocorrências das *keywords microgrids* e *microgrids software* 10
Figura 3 – Hierarquia do sistema de energia integrado brasileiro (SIN) 11
Figura 4 – Contribuição de energia, por origem, ao parque elétrico brasileiro 12
Figura 5 – Rede básica de transmissão nacional 13
Figura 6 – Funcionamento básico de uma *microgrid* 16
Figura 7 – Diagrama de funcionamento da microgrid 19
Figura 8 – Fluxograma do processo de simulação 22
Figura 9 – Fluxograma do algoritmo de Newton-Raphson para a solução de fluxo de potência 24
Figura 10 – Diagrama de conexão da *microgrid* proposta 26
Figura 11 – Curva horária de comportamento da demanda 26
Figura 12 – Curva horária de comportamento de demanda 28
Figura 13 – Curva horária de comportamento do gerador fotovoltaico 29
Figura 14 – Curva horária de comportamento do gerador eólico 30
Figura 15 – Curva horária de comportamento do gerador a diesel 31
Figura 16 – Ambiente de simulação utilizando o *Powerworld* 32
Figura 17 – Relatório de simulação do *Powerworld* 33
Figura 18 – Diagrama do cenário 1: Rede convencional, sem uso de geração distribuída . 34
Figura 19 – Relatório gráfico da simulação do cenário 1 35
Figura 20 – Diagrama do cenário 2: Rede convencional + geração distribuída 36
Figura 21 – Relatório gráfico da simulação do cenário 2 36
Figura 22 – Diagrama do cenário 3: Rede convencional + geração distribuída + diesel . . 38
Figura 23 – Relatório gráfico da simulação do cenário 3 38
Figura 24 – Balanço de potência horário da *microgrid* 39
Figura 25 – Custo horário da *microgrid*) 40
Figura 26 – Impacto na demanda e arrecadação por faixa de adesão 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo no Paraná 2017 27
Tabela 2 – *Microgrid: sem GD* 49
Tabela 3 – *Microgrid: com GD* 50
Tabela 4 – *Microgrid: com GD* 51
Tabela 5 – Impacto da adoção da *microgrid* por faixas de adesão 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
DER	*Distributed energy resource*
DOE	*Department of Energy*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEEE	*Intestitute of Electric*
SIN	Sistema Integrado Nacional
SOS	*System of Systems*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 4

2.1 OBJETIVO GERAL 4

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4

3 JUSTIFICATIVA 5

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7

4.1 Histórico 7

4.1.1 1880 a 1950 - os primeiros sistemas foram criados 7

4.1.2 1960 a 1970 - dependência dos combustíveis não renováveis 7

4.1.3 1980 a 2000 - inovação e diferenças políticas 8

4.1.4 2000 a 2018 - descentralização dos sistemas, geração distribuída 8

4.2 O sistema elétrico brasileiro 10

4.3 Geração 11

4.4 Transmissão e Distribuição 12

4.5 Energia distribuída - DER 12

4.6 *Microgrid* 14

4.6.1 Tipos de microgrid 14

4.6.2 Características básicas 15

4.6.3 Qualidade de energia e uso de *microgrids* 15

4.6.4 Fatores econômicos do uso de *microgrids* 16

4.7 Fontes de energia distribuída 17

5 MATERIAIS E MÉTODOS 18

5.1 *System of Systems* (SoS) 18

5.2 Modelagem da *microgrid* como um SoS 19

5.2.1 Sistema de armazenamento (bateria) 20

5.2.2 Sistema fotovoltaico 20

5.2.3 Carga 21

5.2.4 Controle 21

5.2.5 Simulação 21

5.2.6 Fluxo de potência 21

5.2.7 Método de Newton-Raphson 23

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 25

6.1 Modelagem da *microgrid* 25
6.1.1 *Modelagem da carga Residencial* 25
6.1.1.1 Definição do comportamento 25
6.1.1.2 Definição da carga diária 27
6.1.2 *Modelagem do gerador fotovoltaico* 28
6.1.3 *Modelagem do gerador eólico* 29
6.1.4 *Modelagem do gerador a diesel* 30
6.2 Simulação da *microgrid* 31
6.2.1 *O processo* 31
6.2.2 *Cenário 1: Rede convencional, sem uso de geração distribuída* 34
6.2.3 *Cenário 2: Rede convencional + geração distribuída* 35
6.2.4 *Cenário 3: Rede convencional + geração distribuída + gerador a diesel* 37
6.3 Análise geral e visão macro 39

7 CONCLUSÃO 43
7.1 TRABALHOS FUTUROS 44

Referências 45

Apêndices 48

APÊNDICE A Dados da *microgrid* sem geração distribuída 49

APÊNDICE B Dados da *microgrid* com geração distribuída 50

APÊNDICE C Dados da *microgrid* com geração distribuída e diesel 51

APÊNDICE D Dados do impacto da adoção da *microgrid* por faixas de adesão . . 52

1 INTRODUÇÃO

A proposta de uma *smartgrid*, uma rede de energia inteligente e interconectada, é prover o controle e monitoramento necessários para a conexão de diversas fontes e consumidores de energia em uma longa rede. No caso do Brasil, essa rede extende-se por todo o território nacional, formando uma vasta malha interconectada. O avanço das técnicas de controle e tecnologias relacionadas a potência e energia proporcionam mudanças nos hábitos energéticos de uma nação. A partir deste ponto de vista, as tecnologias que mais têm se destacado são as relacionadas à geração distribuída (GD), pela sua versatilidade, empregabilidade e sustentabilidade. A geração distribuída, segundo o Artigo 14 do Decreto de Lei º 5163 (2004), é considerada como toda produção de energia elétrica que seja entregue por concessionárias de energia, permissionários ou autorizados que, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição, podem injetar e consumir energia. Assim como em países como Japão, Alemanha e EUA, o Brasil também entrou na corrida para desenvolver o parque de fontes de energia distribuída em 2004, com o programa de Incentivo às Fontes Renováveis Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA).

A motivação para tal decisão é a crescente demanda por fontes de energia diferentes, levando ao aumento nas discussões sobre fontes de energia distribuída. A situação se agrava em países em desenvolvimento, onde as redes elétricas não estão preparadas para uma rápida expansão da sociedade e da indústria, tornando o acesso à energia intermitente e não confiável (ELLER; GAUNTLETT, 2017). Visto isso, é importante tomar nota de que o setor energético é em muitas partes ligado ao desenvolvimento econômico e social de um país, levando a esse a infraestrutura básica para o funcionamento de uma nação: energia.

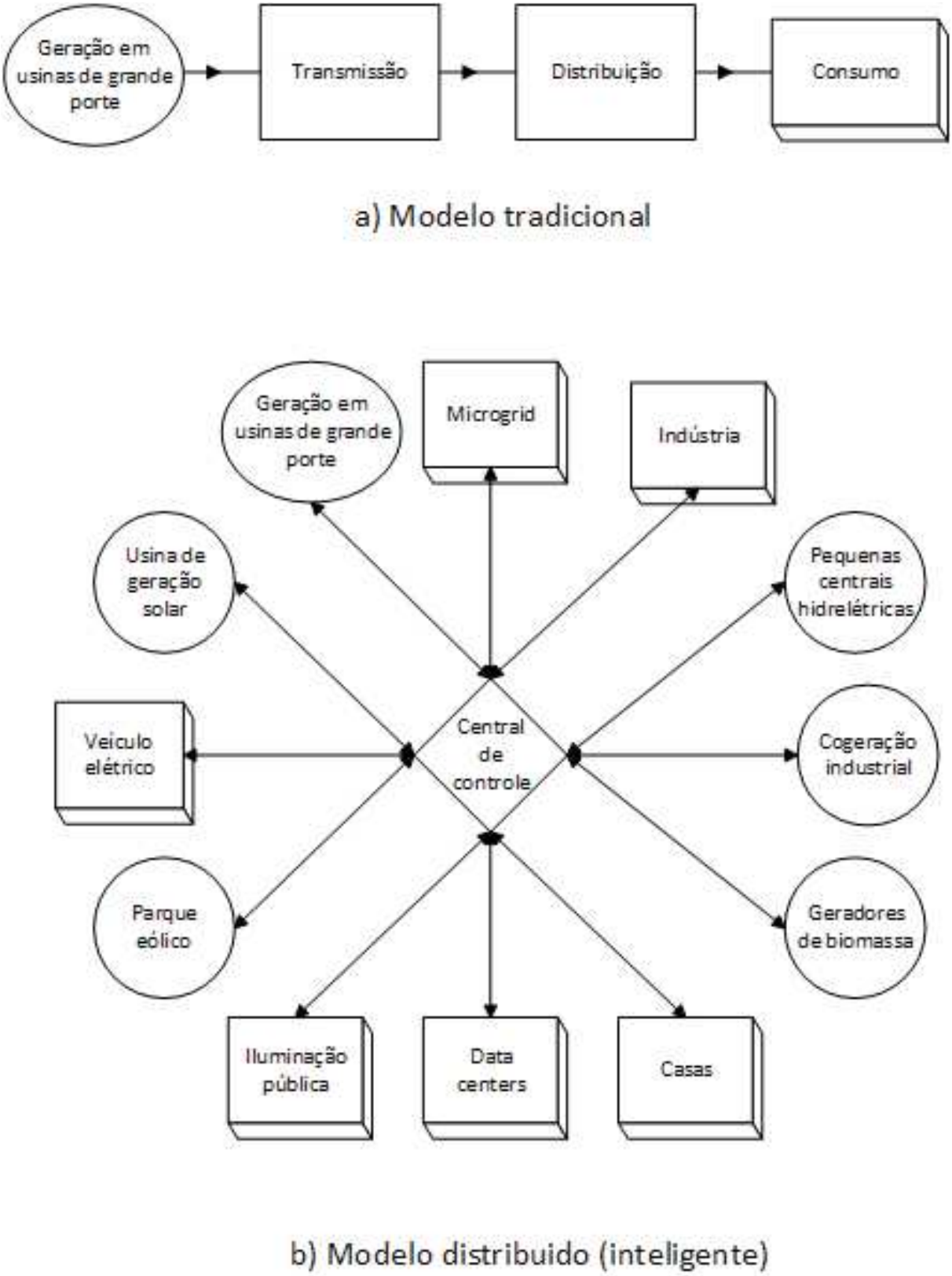
A busca incessante por fontes de energia limpa, com baixa de emissão de CO2 (gás carbônico) e com baixo impacto ambiental eleva a discussões sobre produção e consumo de energia, fatores que impactam diretamente o valor pago pelo consumidor. No presente momento, as fontes de energia distribuídas, solar, eólica, hidráulica, geotérmica, biogás, são alternativas válidas em situações onde as concessionárias de energia não conseguem suprir a demanda com a qualidade necessária, ou quando há interesse de se reduzir a conta de energia. Tais fontes são possíveis de serem consideradas úteis hoje pelo avanço tecnológico, qual visa mitigar as variáveis ligadas à capacidade de produção e armazenagem energética. Nesse contexto, as *microgrids* trazem uma camada a mais de utilidade para estas fontes de energia: a cooperatividade e democratização da energia.

De acordo com Lasseter (2002), o criador do conceito, *microgrids* são unidades de energia de porte pequeno, inferiores a 100 kW, com interfaceamento eletrônico. Entre as suas principais características estão o baixo custo, baixa tensão de uso e alta confiabilidade com baixa pegada ambiental. Com o passar dos anos, arquiteturas para o uso destas redes foram propostas e testadas, desenvolvendo-se tecnologias que permitam utilizar o conceito de *microgrids* como forma de distribuição de energia, sendo esta auxiliar ou de segurança, sendo as áreas médica e

militar as de maior adoção. A Figura 1 a) ilustra o modelo tradicional, com fluxo de energia em apenas uma direção. Neste modelo existem dificuldades em isolar as cargas do sistema, tornando-o menos eficiente em casos de surtos. De forma oposta, a Figura 1 b) mostra o sistema moderno, distribuído e inteligente, com fluxos em ambas as direções pautadas por uma comunicação eficiente entre as extremidades do sistema. Tal comunicação permite a integração dos sistemas, quais por sua vez provêem as condições para a correta operação das cargas ligadas, com um custo por *killowatt* reduzido. Por esta caracterísitica, estabelecimentos comerciais tem adotado as *microgrids* como opção na redução do seu custo de operação.

Além do uso comercial, as *microgrids* têm outro papel: o de integração social, uma vez que fornecem uma plataforma sólida para a eletrificação de áreas antes sem cobertura, ou com baixa confiabilidade, de distribuição de energia das concessionárias. O *Microgrid Institute* (2014) estima que para que seja possível atingir o grau de acesso universal de energia, 70% das áreas que ainda sofrem de falta de cobertura de distribuição de energia sejam conectadas utilizando algum tipo de tecnologia ilhada, ou seja sem conexão com a rede. Tal sistema requer um planejamento e projetos bem executados para que a *microgrid* possa atender às necessidades dos seus usuários. A arquitetura e controle do sistema é peça chave no desenvolvimento deste trabalho, pois assume-se que necessidades energéticas, do ponto de vista técnico, de uma residência podem ser compartilhadas com outras da região, surgindo assim uma pergunta: e se estas residências compartilhassem mais do que as necessidades, suas soluções energéticas? As *microgrids* podem ser responsáveis por flexibilizar a obtenção de energia em nível local, ao mesmo tempo que diminui o impacto ambiental e a dependência das concessionárias de energia.

Figura 1 – Comparativo entre a) modelo tradicional e b) modelo distribuído de energia



Fonte: Adaptado de Lopes, Fernandes e Muchaluat-Saade (2015)

2 OBJETIVOS

Nesta seção consta o objetivo geral assim como os objetivos específicos referentes ao presente trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é efetuar a simulação de uma *microgrid* pequena (menor do que 100KW) com ao menos uma fonte de energia renovável acoplada a ela, analisar os parâmetros de fluxo de potência, balanço de energia e custo operacional. A finalidade destas análises é verificar o impacto do uso de fontes de energia renováveis na operação de uma *microgrid* com fontes de energia distribuídas de forma virtual, sem o uso de equipamentos físicos no processo de simulação e atestar sua empregabilidade. Adicionalmente, espera-se verificar o impacto da adoção das *microgrids* do ponto de vista da demanda e da arrecadação da concessionária de energia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O seguinte trabalho será desenvolvido visando os seguintes objetivos específicos:

- Revisar os indicadores utilizados para caracterizar o fluxo de potência, demanda diária e custo de operação;
- Simular uma rede de *microgrid* para a obtenção de tais indicadores em 3 cenários distintos: convencional, com geração distribuída e com geração distribuída e reforço no horário de pico;
- Analisar os dados obtidos para o fomento da discussão da empregabilidade destes sistemas no mercado de energia brasileiro;

3 JUSTIFICATIVA

A intervenção humana no clima do planeta é um fato que vem taxando seu preço com o passar dos anos e por mais incessante que seja a sede da civilização humana por evolução, os esforços para atingir novos patamares tecnológicos e econômicos devem ser pautados na conscientização imediata e intensa. Não é possível evitar as mudanças climáticas, porém a veemência de suas ocorrências devem ser suavizadas a todo custo e o primeiro passo para tal é a redução da emissão de carbono e de gases relacionados ao efeito estufa. Mudanças decorrentes dessa linha de raciocínio são capazes de alterar o curso de nações, atingir positivamente economias, casos mais visíveis em países em desenvolvimento, quais a falta de esforço acarretam em um menor desenvolvimento regional. Dessa forma, é necessário encontrar meios para adequar os padrões de vida atuais e futuros aos limites impostos pela natureza, segundo Bajay et al. (2018).

Adicionalmente, os recursos naturais vêm se esgotando cada vez mais devido ao crescimento populacional e hábitos de consumo extremistas. Há de se levar em consideração que estes recursos são finitos e fundamentais para a sobrevivência de não apenas a espécie humana mas tantas outras. A energia elétrica é uma das grandes protagonistas quando o assunto é o uso adequado de recursos naturais. Um estudo realizado pelo Laboratório Lawrence Berkeley (2012) verificou que de 80% a 90% das falhas de rede elétrica começam no nível de distribuição do serviço de energia. Adicionalmente, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012) revelou que o custo somado das interrupções de rede acima de 5 minutos ultrapassa os US$ 26 bilhões de custo por ano aos Estados Unidos (HAYDEN, 2013).

Uma solução para este problema é o uso de *microgrids*, pela sua característica não intrusiva, pelo uso preferencial de fontes de energia renováveis e pela facilidade de implantação em pequena escala. Segundo Hayden (2013), as *microgrids* têm como seus três maiores benefícios a habilidade de suprir demandas locais, aumentar a confiança de rede e assegurar o controle do fornecimento de energia, fatores que aumentam a confiabilidade, reduzem o custo da energia e melhoram a segurança da rede local. Sendo assim, as *microgrids* assumem papel central neste trabalho pela sua alta adaptabilidade e confiabilidade, provendo uma base sólida para um estudo dos impactos da distribuição de energia elétrica em âmbito local.

O presente trabalho visa estudar o comportamento de um sistema de *microgrid*, interconexão dos seus elementos e os seus parâmetros de funcionamento. Tal escolha ocorreu pois em um sistema como o de *microgrid* ocorre uma alta dependendência da correta integração dos recursos internos para o cumprimento de uma especificação, ainda que alguns dos elementos não apresentem características de operação contínuas. Esta falta de continuidade só pode ser contornada com a previsão do comportamento destas redes, tarefa que cada elemento participante adiciona uma ou mais camadas de complexidade na análise, requerendo cada vez maior capacidade computacional e de dados para simulação dos modelos.

Segundo Souza, Jota e Tavares (2014), a simulação de *microgrids* é um assunto rela-

tivamente novo no âmbito acadêmico da energia elétrica, assim como o tópico de *microgrids*. Dada a sua longevidade, não são muitas as ferramentas disponíveis no mercado para a simulação de *microgrids*. Entre elas, a que mais se destaca ainda é o *MatLab* e sua forte comunidade, com sua plataforma de simulação *Simulink*. Além desta plataforma proprietária, existem outras duas *open-source* (código aberto): *SGridSim* e *GridLAB*-D, com arquitetura específica para as *microgrids*. Outro software conhecido no meio de sistemas de potência é o *Powerworld*, renomado pela sua versatilidade e facilidade de uso, motivo pelo qual fora escolhido como ferramenta de simulação para este trabalho.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo destina-se a abordar os temas mais importantes sobre a área de *microgrids*, quais envolvem tópicos sobre sistemas elétricos, distribuição e controle de redes elétricas, iniciando-se a discussão através da apresentação do sistema elétrico brasileiro, o sistema integrado nacional (SIN) e em seguida introduzindo a energia distribuída na discussão. Por fim, apresenta-se a *microgrid*, tópico central das discussões.

4.1 Histórico

4.1.1 1880 a 1950 - os primeiros sistemas foram criados

O conceito de *microgrid* iniciou-se em 1882 com a construção da primeira central elétrica, por Thomas Edison (MARNAY; VENKATARAMANAN, 2006). Nos anos seguintes, sua empresa foi responsável por instalar outras 50 *microgrids* de corrente contínua (CC). Naquela época não existia o conceito, muito menos a implantação, de redes grandes e com controle centralizado, caracterizando assim um pleno emprego do conceito de *microgrid*: pequeno, local e controle próximo, rápido e eficiente (PARHIZI et al., 2015).

Ao final do século 19, nos Estados Unidos fora construída a primeira planta hidroelétrica de corrente alternada, em *Niagara Falls*, provendo energia elétrica para cidades em um raio de 20 milhas (aproximadamente 32 quilômetros) de distância. Paralelamente, a década de 1930 já dispunha de empresas que forneciam energia elétrica regulada, o que estimulou a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias envolvendo geradores e transformadores, juntamente com a construção das primeiras plantas de energia nuclear. Ao final da década a maior parte dos esforços foram na construção da usina e barragem *Hoover*.

4.1.2 1960 a 1970 - dependência dos combustíveis não renováveis

Alguns anos à frente, nas décadas de 60 e 70, A popularidade e adoção da energia elétrica tornava-se cada vez mais elevada, incentivando os programas construção de termelétricas, inclusive as usinas nucleares. Mesmo com os esforços empregados, sem o preparo requerido para a manutenção de redes tão extensas, estas décadas foram marcadas por recorrentes apagões.Entre estes, um caso especial em 1965, quando grande apagão deixou 30 milhões de pessoas sem luz em razão da perda de controle de seções da rede geral, acarretando falhas cascateadas de energia. Na década seguinte, em 1977 fora a vez de Nova Iorque sofrer um apagão que em poucas horas estimulou o furto e depredação da cidade, deixando-a com mais de 1.600 lojas assaltadas e mais de 1.000 incêndios.

O setor elétrico tomaria outro rumo em 1978, com a aprovação e implantação de novas políticas no setor da energia dos EUA, possibilitando a comercialização de energia por entidades que não necessariamente fossem as concessionárias de energia, como uma tentativa de melho-

rar as condições de distribuição. Como consequência, este novo comportamento estimulou a discussão em outros países acerca das políticas energéticas adotadas pelos mesmos. A partir de então, políticas econômicas ligadas à energia passaram a ser comuns nas discussões científicas, assim como a conscientização quanto a dependência dos combustíveis fósseis Fora a partir das discussões do final da década de 70 que as opiniões das lideranças dos países mais desenvolvidos da época, Estados Unidos, Japão e Alemanha, começaram a se afastar de um ponto energético comum, o petróleo, formando-se ideologias que contrastavam e ameaçavam a hegemonia econômica americana (CHERP et al., 2017).

4.1.3 1980 a 2000 - inovação e diferenças políticas

As décadas seguintes foram marcadas pela pesquisa e inovação no setor da energia, ao passo que o esforço, das empresas que participavam do sistema de fornecimento de energia, era para compensar o crescimento da população, dos serviços e das indústrias. Até a década de 80 ainda dependia-se muito dos combustíveis fósseis e não renováveis para a entrega de energia frente demanda existente A década de 90 foi marcada pela conscientização ambiental e da completa separação de caminhos das lideranças energéticas.

Segundo relatos de Cherp et al. (2017) no seu trabalho de comparação das transições de energia, o Japão, nessa época, se tornava o líder em energia nuclear, ao passo que a Alemanha se posicionava como a maior defensora das energias renováveis. Ambos países tentavam a todo custo verem suas economias livres da dependência dos combustíveis fósseis, ainda como o autor cita, como forma de se afastarem da potência que eram os Estados Unidos. Ainda nesta década, inúmeros programas de incentivo às energias renováveis nasceram e abriram as portas para o novo milênio.

4.1.4 2000 a 2018 - descentralização dos sistemas, geração distribuída

Logo após três décadas como líder de produção de energia, os combustíveis fósseis começaram a dar sinais de esgotamento, não restando aos Estados Unidos opção senão a adoção das energias alternativas, em prol da sustentabilidade citada por Pisani (2006), qual fora fortemente refutada nos anos anteriores, quando a aposta ainda era nos combustíveis não renováveis. Em 2002, o conceito de *microgrids* nasce, pelo artigo de Robert Lasseter: *MicroGrid*. Os anos seguintes foram de experimentação e disseminação do conceito. Em 2008, discutiam-se as dificuldades da implantação de redes com fontes de energia alternativa como uma forma sustentável e confiável de obtenção de energia.

Em 2011, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (United States Department of Energy, 2011) divulga um relatório que contém a análise sobre o uso de fontes de energia alternativa e distribuída, assim como os maiores desafios da implantação de *microgrids*. Em 2012, o mesmo grupo criou uma iniciativa que considerou as *microgrids* como elemento chave para o futuro da rede elétrica americana, estabelecendo esta área de energia como foco de desenvolvimento e pesquisa nacional. Seguidamente foram conduzidos *workshops* que contaram

com a participação de grandes figuras da academia e do mercado da energia elétrica, quais buscaram identificar as maiores necessidades e desafios da área. Estas discussões influenciaram positivamente o status das *microgrids*, aumentando ainda mais a aderência do tópico na sociedade. A padronização e popularização do conceito de *microgrids* estava encaminhada, assim como a adoção da energia renovável pelos Estados Unidos.

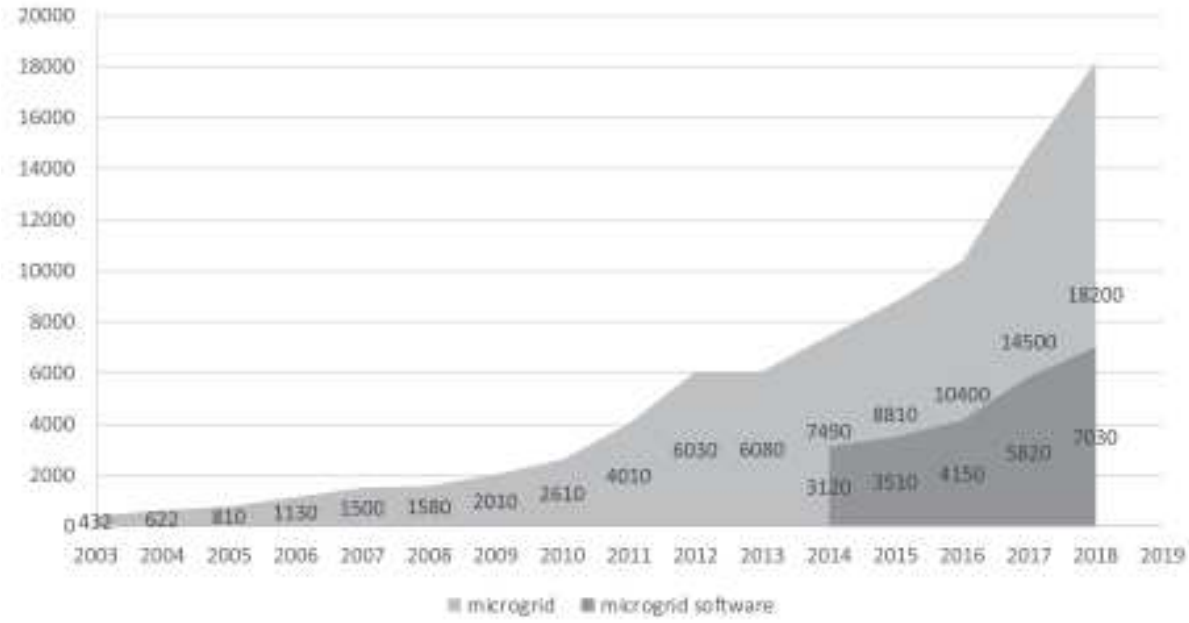
Em 2013, o artigo intitulado *"Introduction to Microgrids"*, por Hayden (2013), consultor especialista da empresa *Securicon*, torna-se o artigo de facto para a introdução ao assunto das *microgrids*. Os anos de 2014 e 2015 foram marcados por estudos que detalham melhor as características das *microgrids*, como o artigo *"A Comprehensive Study on Microgrid Technology"* de Hossain et al. (2014), o livro *"Microgrids: Architectures and Control"* de Hatziargyriou (2014) publicado pela *IEEE*. Ainda neste período o tema fora citado em diversos relatórios como *"Trends in global CO2 emissions"* de Oliver et al. (2015), qual indica a inclusão do tema como foco de ação para os governos e lideranças, colocando o uso de fontes de energia distribuídas como a melhor prática para o desenvolvimento sustentável, desde pequenas até grandes escalas.

Seguidamente, no ano de 2016 diversos estudos foram publicados sobre a adoção, controle e o impacto das *microgrids* nas diversas escalas de rede, levando em consideração aspectos como: políticas públicas e econômicas, como no artigo *"Microgrid: Architecture, policy and future trends"* de Mariam, Basu e Conlon (2016); controle e distribuição em larga escala da energia proveniente de uma fonte renovável, como no artigo *"Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources"* de Lv e Ai (2016).

O ano de 2017 foi importante para as *microgrids* pois estas já estavam em funcionamento há tempo suficiente para serem analisados os impactos reais da sua utilização. Impactos sendo eles ambientais, sociais e econômicos, como no artigo *"Evaluating business models for microgrids: Interactions of technology and policy"* de Hanna et al. (2017). Juntamente, estudos que apontavam a deficiência em tecnologias relacionadas às *microgrids* foram muito importantes para o desenvolvimento de novas linhas de pesquisa, como as de baterias e de modelos de distribuição de energia entre usuários de uma *microgrid*, como apontado por Zhang et al. (2017) no artigo *"Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects"*.

Paralelamente, as *microgrids* eram assunto em revistas de software e comunicação de dados, pois estas redes necessitam de sistemas auxiliares de controle e monitoramento, para a correta operação e manutenção das redes, sejam elas em pequena, média ou grande escala. O número de ocorrências de citações do termo *microgrid* como palavra-chave em publicações vem aumentando, segundo o gráfico da figura 2, gerado a partir do site *Google Scholar*, indicando o constante aumento da popularidade do tema. Percebe-se também o aumento da popularidade do tema *microgrid* associado ao termo software, confirmando as tendências explicitadas nos artigos citados nesta revisão histórica.

Figura 2 – Ocorrências das *keywords microgrids* e *microgrids software*



Fonte: *Google Scholar (2019)*

4.2 O sistema elétrico brasileiro

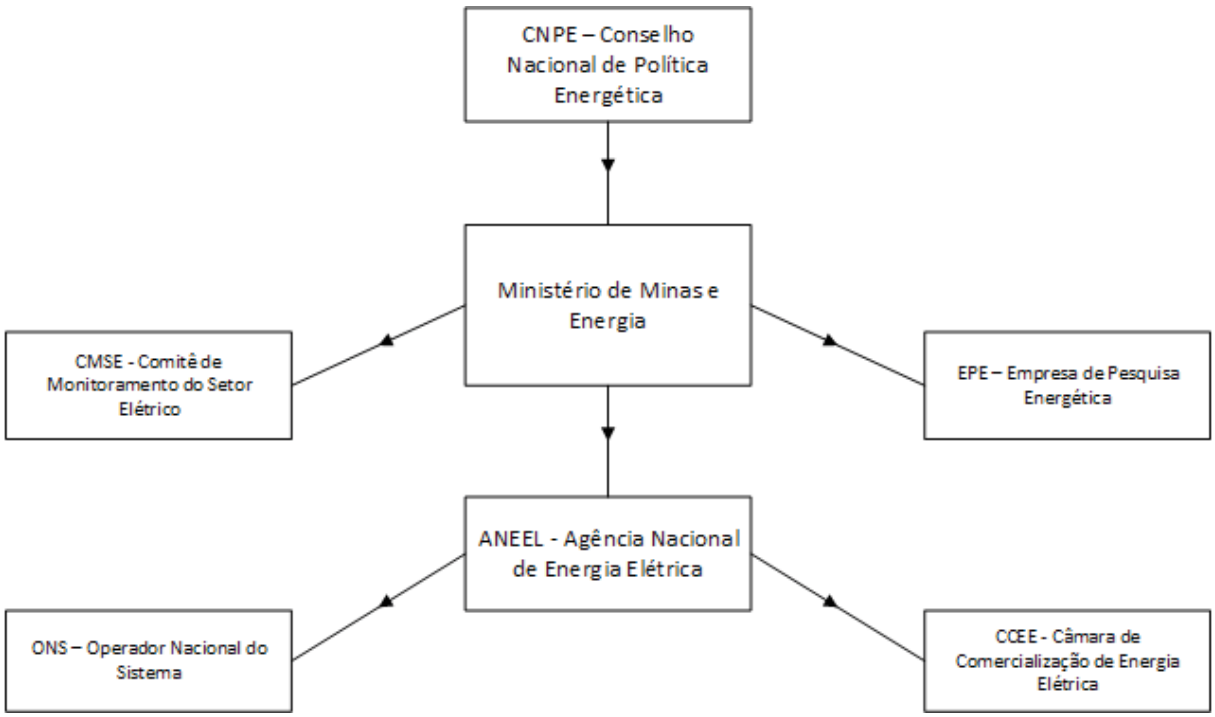
Antes de analisar as *microgrids* se faz necessário conceituar a situação atual da energia elétrica, ou seja, a forma com que tradicionalmente se gera, transporta e distribui energia. Para que seja possível compreender alguns aspectos sobre a situação política e econômica atual da geração distribuída é necessário compreender o sistema elétrico brasileiro. Ele é mantido, controlado e executado por um conjunto de órgãos interdependentes. A figura 3 demonstra a hierarquia do sistema de energia brasileiro. Segundo Bajay et al. (2018), o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) é o órgão de nível de poder mais elevado, respondendo diretamente à Presidência da República do Brasil. Resoluções aprovadas por este valem como decretos, já que expressam a vontade direta do comando do país. O Ministério de Minas e Energia (MME) acolhe e acata as decisões tomadas pelo CNPE e repassa as resoluções à frente. Os órgãos imediatos do Ministério de Minas e Energia, segundo o próprio, são:

- CMSE, Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico, sendo sua função acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento de energia por todo o território nacional;
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética, uma empresa pública federal, que tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, cobrindo as subáreas de energia elétrica, combustíveis fósseis e os biocombustíveis;
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, regular e fiscalizar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em território nacional, incluindo o estabelecimento de

tarifas. A ANEEL por sua vez regula outros dois órgãos: ONS, Operador Nacional do Sistema (Elétrico), é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país;

- CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, responsável por viabilizar as atividades de compra e venda de energia em todo o país, promovendo discussões voltadas à evolução do mercado da energia.

Figura 3 – Hierarquia do sistema de energia integrado brasileiro (SIN)

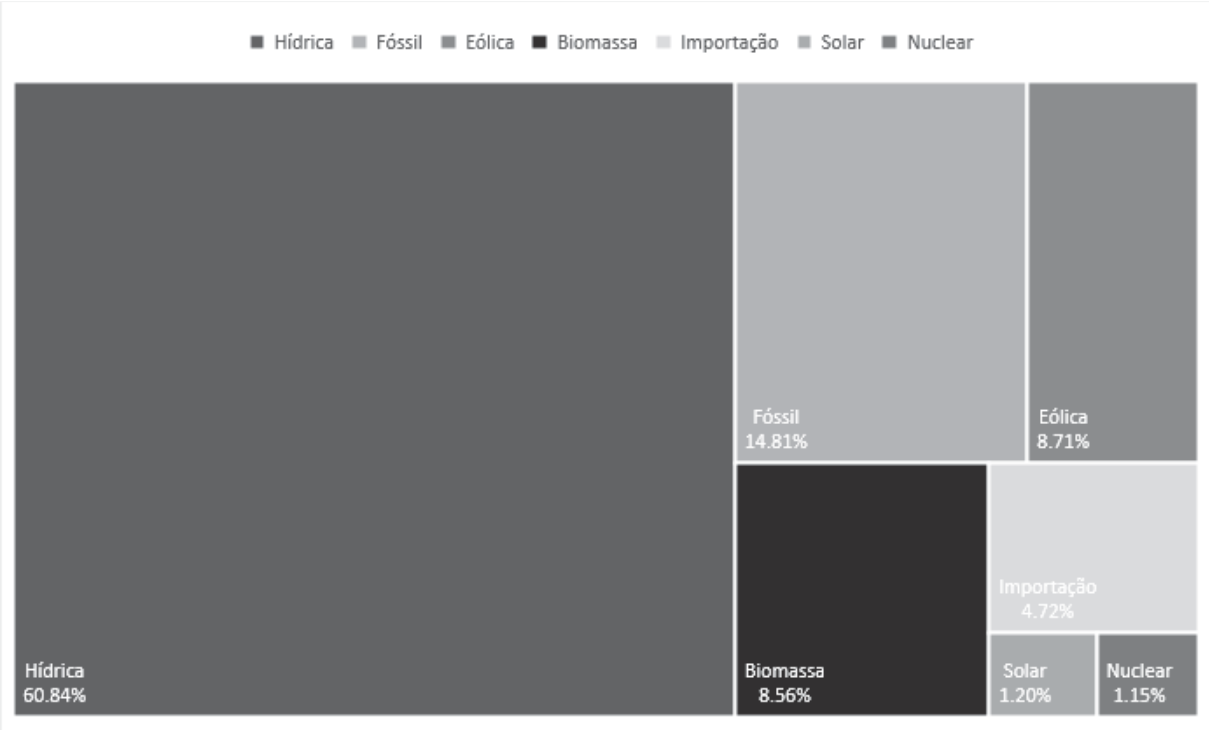


Fonte: *Bajay et al. (2018)*

4.3 Geração

O sistema de geração de energia brasileiro possui 7.437 empreendimentos em operação, efetivamente provendo mais de 170.000.000 KW de potência instalada. Desses, tem-se a produção hídrica disparada na frente, segundo os dados do BIG, Banco de Informações de Geração, da ANEEL (2019). A figura 4 demonstra o comparativo entre as contribuições de cada um dos tipos de produção participantes na malha brasileira, sendo eles hídrica com 60.84%, fóssil com 14.81%, eólica em terceiro lugar, com 8.71%, biomassa com 8.56%, energia oriunda de importação representa 4.72% do total, solar com 1.20% e nuclear com 1.15%.

Figura 4 – Contribuição de energia, por origem, ao parque elétrico brasileiro



Fonte: ANEEL (2019)

4.4 Transmissão e Distribuição

A distribuição de toda energia gerada é de responsabilidade compartilhada entre os órgãos citados no início do capítulo. A dimensão dessa distribuição é nacional, isso implica em uma grande *smartgrid*, uma rede inteligente interconectada a nível nacional. A figura 5 demonstra a extensão das linhas de transmissão do país em 2017. Esse sistema é conhecido como SIN, Sistema Interligado Nacional.

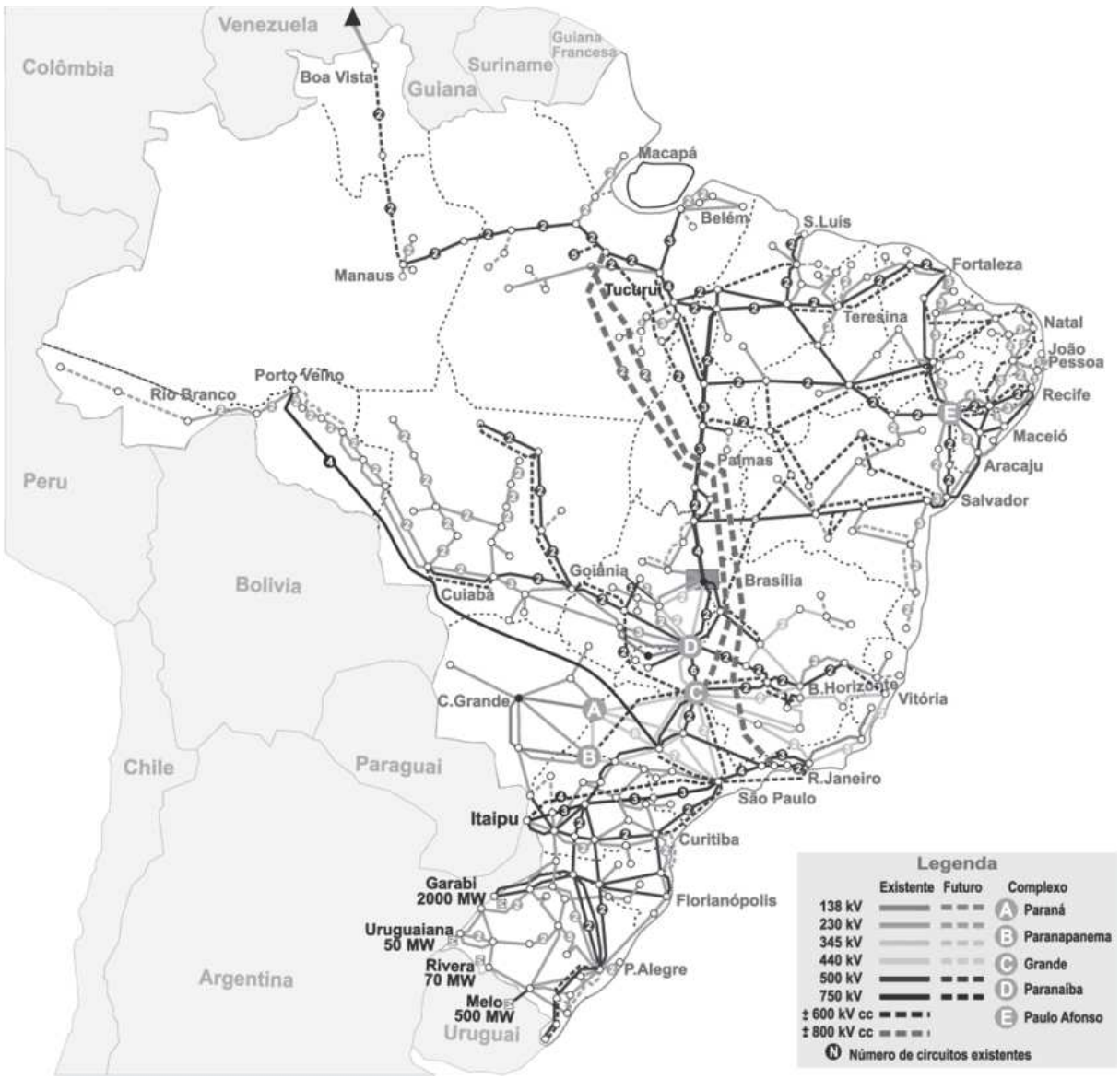
4.5 Energia distribuída - DER

Espera-se em qualquer sistema que sua eficiência seja alta e tal trabalho fica a cargo dos seus projetistas. Tal situação é mais complexa de se satisfazer em um sistema como o de transmissão e distribuição de energia, principalmente no quesito expansão, uma vez que o aumento de demanda acompanha a evolução da civilização como um todo.

Incentivos econômicos, tecnológicos e ambientais têm mudado a visão das autoridades de energia quanto ao ciclo de vida da energia: geração, transmissão, distribuição e consumo. O modelo tradicional, centralizado, começa a dar lugar a uma topologia distribuída, descentralizada, de fornecimento de energia, sendo a maior motivação para tal a deficiência energética e econômica do modelo antigo(LASSETER; PAIGI, 2004). Por essa razão, é esperado que a eficiência energética ande ao lado das fontes de energia distribuída.

De acordo com Friedman (2002) a geração de energia a partir de fontes distribuídas

Figura 5 – Rede básica de transmissão nacional



Fonte: Freitas (2017)

pode ser caracterizada pelo uso de tecnologias como motores a combustão, cogeração, células combustíveis, painéis fotovoltaicos, turbinas de geração eólica, micro turbinas hidráulicas, quais podem ser conectados ao sistema elétrico através de inversores.

Percebe-se uma mudança de paradigma entre as figuras 7a) e 7b), pois na primeira existia uma topologia linear, fixa, e é possível ver um fluxo único da energia. Já na segunda, a situação necessita uma central de controle, que consiga conectar as diversas fontes aos diversos pontos de consumo. Essa distribuição de responsabilidades é parte crucial da geração distribuída, pois diminui a necessidade da dependência em um único sistema. Estes podem operar como suporte ao sistema geral ou uso localizado. Para áreas remotas, o uso de *microgrids* e fontes de energia renováveis são a forma de produzir energia com maior custo-benefício (DESHMUKH; DESHMUKH, 2008).

No Brasil, dadas as diversas bacias hidrográficas, como visto na figura 5, a energia é obtida em diversos lugares, mas de forma massiva. Neste trabalho sobre *microgrids* será utilizado o mesmo conceito, porém com cargas muito menores do que os megawatts produzidos pelas hidrelétricas, conceitos quais serão abordados no tópico seguinte.

4.6 *Microgrid*

O termo *microgrid* é tão antigo quanto a história da energia elétrica moderna. O conceito já era praticado desde a primeira estação de energia em 1882, construída por Thomas Edison, mais conhecida como *Pearl Street Station*, em Manhattan, Nova Iorque - EUA. Tal fato explica-se pois na época não ainda existia uma rede de energia de larga escala, o que permite considerar que tal planta operava em escala local. A evolução dos conceitos e tecnologias acerca o tema torna-se cada vez mais justificável frente à crescente população mundial, principalmente em países emergentes.

Nestes casos, países que não detém fontes de energia estáveis podem acabar passando por falta energia, generalizada ou localizada, fator que dificulta o desenvolvimento regional e por conseguinte o de cada país. É nesse momento que o uso de fontes de energia distribuída é plenamente justificável. A questão nesse caso é como aplicar esse conceito de forma sustentável e confiável? Em 2002, Robert Lasseter surgiu com um conceito que seria uma resposta direta a esse problema: *microgrid*. Para ele, uma *microgrid* seria composta por uma ou mais cargas e fontes de energia que podem funcionar de forma conectada à rede ou ilhada.

4.6.1 Tipos de microgrid

Segundo Hayden (2013), os tipos gerais de *microgrid* são:

- *Microgrids* institucionais/locais: são redes com foco em agregar a geração local com múltiplas cargas situadas nas premissas da rede, quais podem ser facilmente gerenciadas;
- *Microgrids* remotas: estas redes nunca se conectam à rede principal e sua operação se dá apenas de forma ilhada, por razões econômicas ou geográficas. Este tipo de *microgrid* é tipicamente instalada em áreas que são distantes de quaisquer pontos de transmissão ou de alguma infraestrutura consolidada de distribuição, tornando a conexão impossível ou de difícil manutenção;
- *Microgrids* militares: o foco deste tipo de rede é aumentar o nível de segurança nas instalações militares, aumentando a resiliência do sistema em caso de falha da rede principal;
- *Microgrids* industriais/comerciais: este tipo de *microgrid* vem se tornando uma escolha comum nos países da América do Norte e da Ásia do Pacífico, pois fornecem maior resiliência da rede local e maior segurança, como backup à rede principal, além de poderem controlar o uso durante determinados períodos do dia, auxiliando na fatura de energia e eventuais problemas de *downtime* (tempo morto de serviço). Ainda assim, este

tipo de uso ainda sofre de falta de regulação e distribuição de conhecimento quanto aos padrões de segurança e uso.

4.6.2 Características básicas

A modelo de *microgrids* engloba 4 pontos específicos, de acordo com o relatório sobre *microgrids* do Departamento de Energia dos Estados Unidos (United States Department of Energy, 2011):

- Geração local: uma *microgrid* deve apresentar uma ou mais tipos de fontes de energia, para que possa ser transmitida ao usuário. As fontes podem ser renováveis ou de combustíveis fósseis;
- Consumo local/distribuído: uma *microgrid* deve conter elementos de consumo de energia, quais podem ser um ou mais dispositivos como iluminação, sistemas de aquecimento, baterias. A ideia é poder ter cargas previsíveis e controláveis;
- Armazenamento de energia: uma *microgrid* pode operar tanto de maneira ilhada quando conectada à rede central (no caso do Brasil, o SIN), logo, para momentos onde está conectada, ou quando há excedente, é necessária a armazenagem da energia. Outro fator importante se dá pela necessidade de controle e manutenção da qualidade da energia, incluindo sua frequência e regulação de tensão. Tais características normalmente variam de acordo com a característica da fonte de energia utilizada;
- Ponto de acoplamento comum (PCC): é o ponto de conexão do circuito que se conecta com a rede principal de energia. *Microgrids* que não têm esse elemento são consideradas ilhadas;

4.6.3 Qualidade de energia e uso de *microgrids*

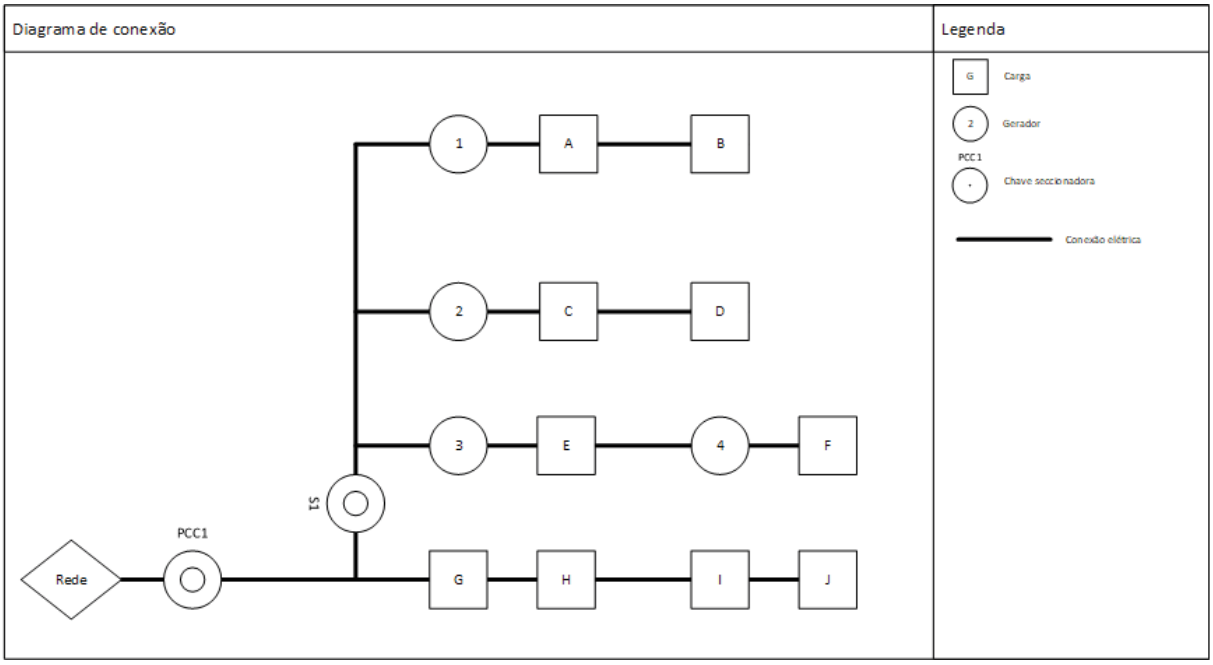
Mesmo com as vantagens apresentadas para o uso das fontes de energia distribuída, sem a devida abordagem, os resultados podem não agradar os consumidores e autoridades locais. Cada tipo de fonte de energia tem suas particularidades, quais podem causar distúrbios diferentes no sinal de energia gerada. Tais distúrbios se não tratados tornam-se problemas, pois os equipamentos ligados à rede operam com determinados padrões de qualidade de energia. Uma melhor forma de resolver esta situação é tomar o potencial de energia distribuída de forma sistêmica e efetuar um levantamento da capacidade de produção de energia, aliada a uma análise dos tipos de carga acopladas à rede local. Segundo Lasseter e Paigi (2004), a garantia de qualidade e controle da produção local de energia é dependente destes procedimentos e plenamente determinante para a completa interrupção do uso de energia da rede principal.

Não sendo suficiente apenas a desconexão da rede principal, uma *microgrid* pode ter diversas sub redes, que podem ou não se conectar à determinadas fontes de energia. Este tipo de arquitetura serve para aumentar a qualidade e confiança da operação de uma *microgrid*, como por exemplo, em uma situação em que uma *microgrid* seja utilizada como sistema de segurança em um hospital, quais têm seus serviços prioritários, como UTI's, e podem ser capazes de

manter estes serviços com a rede auxiliar, enquanto os demais serviços ficariam sem energia. Sendo assim, o conceito de *microgrid* é levar a ideia de *plug-and-play* para as redes elétricas, implicando na conexão e desconexão de um ponto específico de uma rede sem que seja necessária um processo de reengenharia para o mesmo.

O esquema de funcionamento de uma *microgrid* simples pode ser verificado na figura 6. É possível ver que a chave seccionadora S1 consegue separar o ramos superiores do circuito. Nesse caso, se a *microgrid* estiver operando em modo ilhado, ou seja, com PCC1 aberto, não há alimentação no ramal inferior de energia.

Figura 6 – Funcionamento básico de uma *microgrid*



Fonte: Lasseter e Paigi (2004)

4.6.4 Fatores econômicos do uso de *microgrids*

A energia que move um país tradicionalmente tem sido gerada por grandes usinas, de maneira centralizada. Tal energia, em países desenvolvidos, normalmente é produzida por combustíveis não renováveis, fator ligado diretamente com a degradação ambiental. Em um sistema de energia centralizado, o custo da energia varia, pois cada fase no ciclo de vida da energia, desde a geração nas usinas, transmissão pelas longas linhas dispostas pelo país e distribuição, através das subestações e postes das cidades, agregam valor ao custo total, que é utilizado para o cálculo da tarifa de energia. Entretanto, ainda que realizadas as manutenções, as perdas são inevitáveis e o custo destas é repassado ao consumidor final. Segundo Mariam, Basu e Conlon (2016), as perdas no ciclo de vida da energia é frequentemente ignorado nas discussões sobre as relações de custo benefício entre a geração em pequena e larga escala.

Entretanto, ainda é considerado elevado o custo da implantação de aplicações utilizando fontes de energia renováveis e com uma baixa densidade de produção energética. Sendo assim, estudos de viabilidade econômica para o uso de *microgrids* é muito importante, apesar da sua visível contribuição para com a sustentabilidade ambiental.

4.7 Fontes de energia distribuída

Microfontes ou fontes de energia distribuída, são fontes de energia que, segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (United States Department of Energy, 2011) são sistemas de armazenagem ou produção de energia de pequena escala, tipicamente entre 1KW a 10.000KW, usadas como suplementação ou alternativa à rede geral de energia.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho baseia-se no artigo *"Modeling and Simulation of Microgrid"*, de Alzahrani et al. (2017), utilizando os modelos propostos para que seja possível realizar a simulação por meio de software. Para a correta simulação da *microgrid*, modelos devem ser criados para cada um dos elementos da rede, sendo estes participantes de um sistema global, complexo: um *System of Systems* (SoS). O conceito é oriundo da engenharia de sistemas e, apesar da sua curta existência, já é reconhecido pelo uso em sistemas em tempo real e simulações de hardware em *loop*, como simulações de sensores e atuadores de veículos. Inicialmente utilizado na área da tecnologia da informação e hoje é mais difundido entre diferentes domínios.

A definição mais comum de SoS, segundo Alzahrani et al. (2017), é a de que SoS's são sistemas de larga escala integrados, autônomos e diversificados, mas que trabalham juntos a fim de atingir um objetivo em comum. A *microgrid* deste trabalho será um SoS que contará com sistemas menores, como baterias, painéis fotovoltaicos e cargas, elementos típicos de uma rede de distribuição. O capítulo atual será dividido em subtópicos que abordarão cada um dos aspectos anteriormente citados, de forma detalhada. O objetivo do capítulo é discutir sobre a simulação do ambiente proposto por Alzahrani et al. (2017), com 4 unidades consumidoras, 3 fontes de energia, uma bateria e a rede externa de distribuição. Para que isso seja possível, utiliza-se o conceito de *System of Systems*, ou seja, que cada elemento, ou nodo, da *microgrid* seja independente no quesito operacional. Os modelos para cada um dos elementos é apresentado e é parte do trabalho construir estes no software de simulação *Simulink*. Por último, serão comparados os dados obtidos nas simulações e, após o devido tratamento, serão comparados com os dados apresentados no artigo *"Modeling and Simulation of Microgrid"*(ALZAHRANI et al., 2017).

5.1 *System of Systems* (SoS)

O intuito de incluir este conceito no trabalho é de prover uma arquitetura de performance, pela habilidade que ela tem de lidar com sistemas heterogêneos, ao contrário de sistemas monolíticos complexos, onde não há arquitetura, os dados fluem dentro de um mesmo sistema, sem delegação de tarefas internamente. Os sistemas dentro de um SoS podem funcionar de forma independente e sem sistema algum exercer poder sobre o outro. Entretanto, os subsistemas são interconectados, a fim de se comunicarem eficientemente e transmitirem tarefas uns aos outros, em prol de atingir uma missão geral pré-definida. Algumas características que definem SoS's, segundo Alzahrani et al. (2017), são:

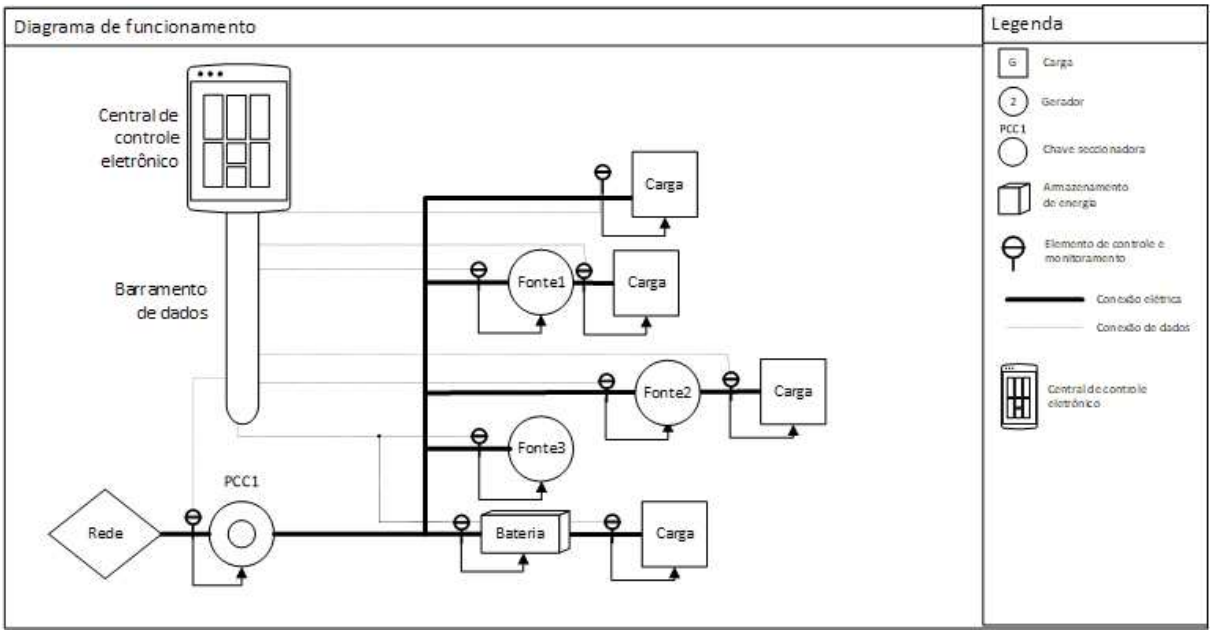
- Independência operacional: todos os subsistemas trabalham independentemente e não fazem interface com outros subsistemas;
- Desenvolvimento evolucionário: o sistema geral não é monolítico, ao invés disso ele é flexível à adoção de novos subsistemas;

- Comportamento emergente e cooperativo: todos os subsistemas trabalham de forma coletiva para atingir um objetivo maior;
- Distribuição geográfica: os subsistemas são distribuídos de forma sequencial, visando a facilitação do fluxo de informação
- Independência administrativa: os subsistemas estão em controle da sua operação

5.2 Modelagem da *microgrid* como um SoS

A proposta é desenvolver uma *microgrid* contendo fontes renováveis de energia. Tais fontes estão conectadas a um barramento CC, através de acoplamentos eletronicamente controlados, como conversores bidirecionais, assim como o autor sugere. Esta arquitetura permite a rápida comunicação entre as fontes e as cargas do sistema, fornecendo energia em casos de falta de energia. Um sistema complexo pode ser qualquer tipo de sistema que contenha um grande número de elementos que tenham características distintas e não linearidades entre sua entrada e saída, fatores que afetam as interações entre os componentes. A conectividade dos componentes da *microgrid* do presente trabalho encontra-se na Figura 7, onde verifica-se a presença de três tipos de fontes, uma carga, uma bateria e a conexão com a rede principal, formando uma pequena rede de sistemas. A interdependência, a complexidade de operação, adaptatividade e cooperatividade, que são características típicas de um SoS e que analogamente são pontos desejáveis em uma *microgrid*. Sob tal ponto de vista, utiliza-se destas similaridades entre as complexas redes de computadores e as grandes redes elétricas de distribuição para, em escala reduzida, tratar as *microgrids* como um SoS.

Figura 7 – Diagrama de funcionamento da microgrid



Fonte: Diagrama próprio, baseado em Alzahrani et al. (2017)

5.2.1 Sistema de armazenamento (bateria)

A bateria é um elemento primordial na *microgrid*, pois ela entra em operação não só quando há baixa de energia na rede geral, mas constantemente apoiando o processo de regulação de energia, processo requerido dada à variabilidade das energias renováveis. Sendo assim, ela opera entre as cargas e as fontes, entrando em ação quando requisitada, guardando energia nos demais momentos.

A capacidade de armazenamento de uma bateria é um fator importante e deve estar de acordo com a demanda de energia da rede, em caso de falha no fornecimento de energia geral. O cálculo do tamanho da bateria, segundoDeshmukh e Deshmukh (2008), é determinado pelo período de fornecimento da bateria, referenciado como dias de autonomia, período entre 2 a 3 dias, normalmente. Este conceito é expressado pela equação 1.

$$B_{cap} = \frac{E_{carga(Ah)} \times Dias_{off}}{Descarga_{max} \times \eta_{temp}} \tag{1}$$

Na equação 1 , B_{cap} é a capacidade da bateria, $E_{carga(Ah)}$ é a carga que necessita da energia da bateria, em ampères hora, $Dias_{off}$ são os dias de autonomia, $Descarga_{max}$ é a máxima descarga que a bateria poderá sofrer antes de cessar seu fornecimento e η_{temp} é o coeficiente de correção de temperatura. A diferença entre a energia gerada e o consumo da carga decidirá se a bateria está carregando ou fornecendo energia. A quantidade de carga do banco de bateria, dado um tempo t pode ser calculada utilizando a equação 2.

$$E_b(t) = E_{bateria}(t-1)(1-\sigma) + (E_{gerada}(t) - \frac{E_{carga}(t)}{\eta_{inversor}})\eta_{bateria} \tag{2}$$

Na equação $E_b(t)$ e $E_{bateria}(t-1)$ são as cargas do banco de bateria em tempos t e $t-1$; σ é a taxa de autodescarga da bateria, $E_{gerada}(t)$ é o total de energia gerada pela fonte de energia, no tempo t após a falha de energia da rede; $\eta_{inversor}$ e $\eta_{bateria}$ são as eficiências de operação do inversor e bateria, respectivamente. A *microgrid* em questão utilizará uma bateria de 60kWh (ALZAHRANI et al., 2017).

5.2.2 Sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é complexo, dependendo de diversos parâmetros, tais como irradiação solar, temperatura de operação interna e externa, rendimento dos equipamentos. Estes parâmetros auxiliam na construção do modelo proposto por Deshmukh e Deshmukh (2008), disponível na equação 3.

$$P_{sj} = I_{Tj}\eta A_{FV} \tag{3}$$

A equação modela a quantidade de energia fornecida a cada hora, em kWh, tendo como parâmetros a irradiação solar média diária do mês j, a área total do painel fotovoltaico e a eficiência do sistema. A *microgrid* em questão terá painéis fotovoltaicos de 2.4kWh (ALZAHRANI et al., 2017).

5.2.3 Carga

Para o presente trabalho serão utilizados 3 tipos de cargas: resistivas, indutivas e capacitivas e serão testadas as combinações das mesmas. Cada uma delas é modelada por um resistor, capacitor e indutor, respectivamente, sendo todos eles variáveis. A decisão de utilizar componentes simples para a modelagem da carga surgiu da leitura do artigo *"Load Modelling - A Review"*, de Arif et al. (2018), uma vez que modelos de carga constante representam ainda 81% das simulações em artigos.

5.2.4 Controle

A abordagem de controle escolhido é o de controle hierárquico, área de controle que utiliza camadas para o controle de um sistema. No caso do presente trabalho, ele é empregado através de 3 camadas: a primeira camada, responsável pelo controle do *droop*. A segunda camada é responsável por verificar os erros da primeira camada. A última camada monitora o fluxo de energia do ponto em questão para a *microgrid* e *vice versa*. Sendo assim, o controle é aplicado visando o balanço entre a geração de energia, a armazenagem e a demanda da carga.

5.2.5 Simulação

A plataforma de simulação escolhida foi o software *Powerworld*. Este software permite a simulação de redes de potência, analisando diversos aspectos de operação que vão desde fluxo de potência e carga, análise transitória, conexão e ilhamento de subsistemas, análise de condição de operação, entre outras. O processo de simulação representa a utilização da *microgrid* média do valor referemte ao período de uma hora, utilizando o método de *Newton-Raphson* para efetuar o cálculo dos parâmetros de fluxo de potência dos elementos da rede. Estes parâmetros serão armazenados e comparados com as diferentes configurações propostas para a *microgrid*.

5.2.6 Fluxo de potência

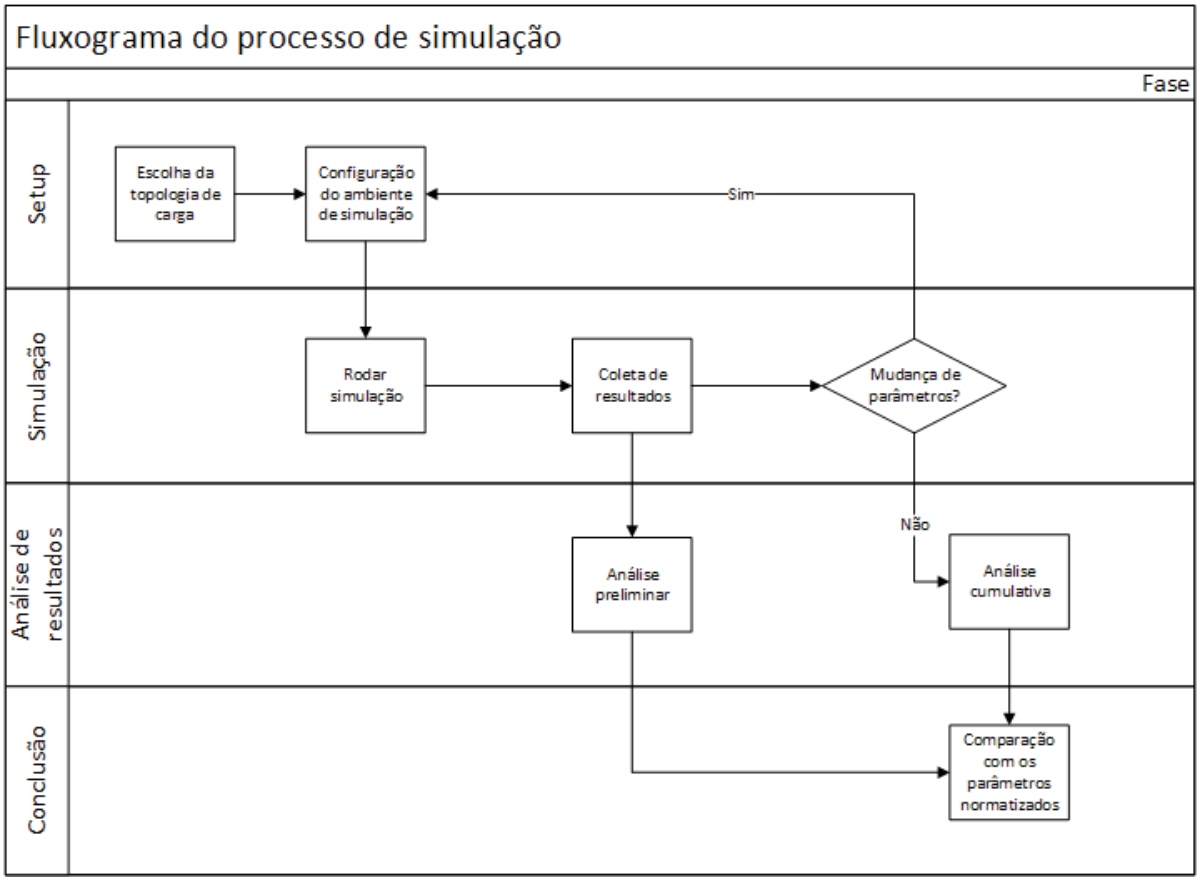
O fluxo de potência é uma análise das condições de operação de um sistema elétrico de potência em regime permanente. Para esta análise, são considerados parâmetros como tensão, corrente, potência ativa e reativa e a troca destes entre as barras que compõem um sistema elétrico de potência ou até mesmo uma *microgrid*. Os sistemas que formam um sistema de elétrico de potência separam-se em dois grupos distintos: os ligados a nós, como linhas de transmissão e transformadores; e os que estão ligados ao terra, como geradores, cargas e elementos passivos.

Segundo Alves (2007), a análise do fluxo de potência tem como objetivo analisar uma rede sobre os seguintes pontos de vista:

- Planejamento e operação
- Segurança e resiliência da rede
- Inconformidades de rede e gestão de risco

Cada barra da rede pode ser associada a quatro variáveis, sendo elas

Figura 8 – Fluxograma do processo de simulação



Fonte: Diagrama próprio

- V_k magnitude de tensão nodal na barra k
- θ_k ângulo de tensão nodal na barra k
- P_k potência ativa na barra k
- Q_k potência reativa na barra k

Para a solução do problema assume-se que pelo menos duas das variáveis acima são conhecidas em um problema, as ouras serão obtidas através de algum método. No caso deste trabalho, o método é o de *Newton-Raphson*. As barras de conexão do sistema são classificadas em 3 tipos:

- Slack, onde são conhecidas a tensão e o ângulo da barra
- PV ou barra de geração, onde são conhecidas a potência e a tensão
- PQ ou barra de carga, onde são conhecidas a potência ativa (P_k) e reativa (P_k)

O funcionamento é regido plenamente pela primeira lei de Kirchoff, onde tem-se que as potências geradas, ativas e reativas, são iguais ao somatório dos fluxos que deixam a barra através das linhas de transmissão, as equações 4 e 5 representam a máxima anterior.

$$P_k = \sum_{m_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \tag{4}$$

$$P_k = \sum_{m_k} P_{km}(V_k,V_m,\theta_k,\theta_m) \tag{5}$$

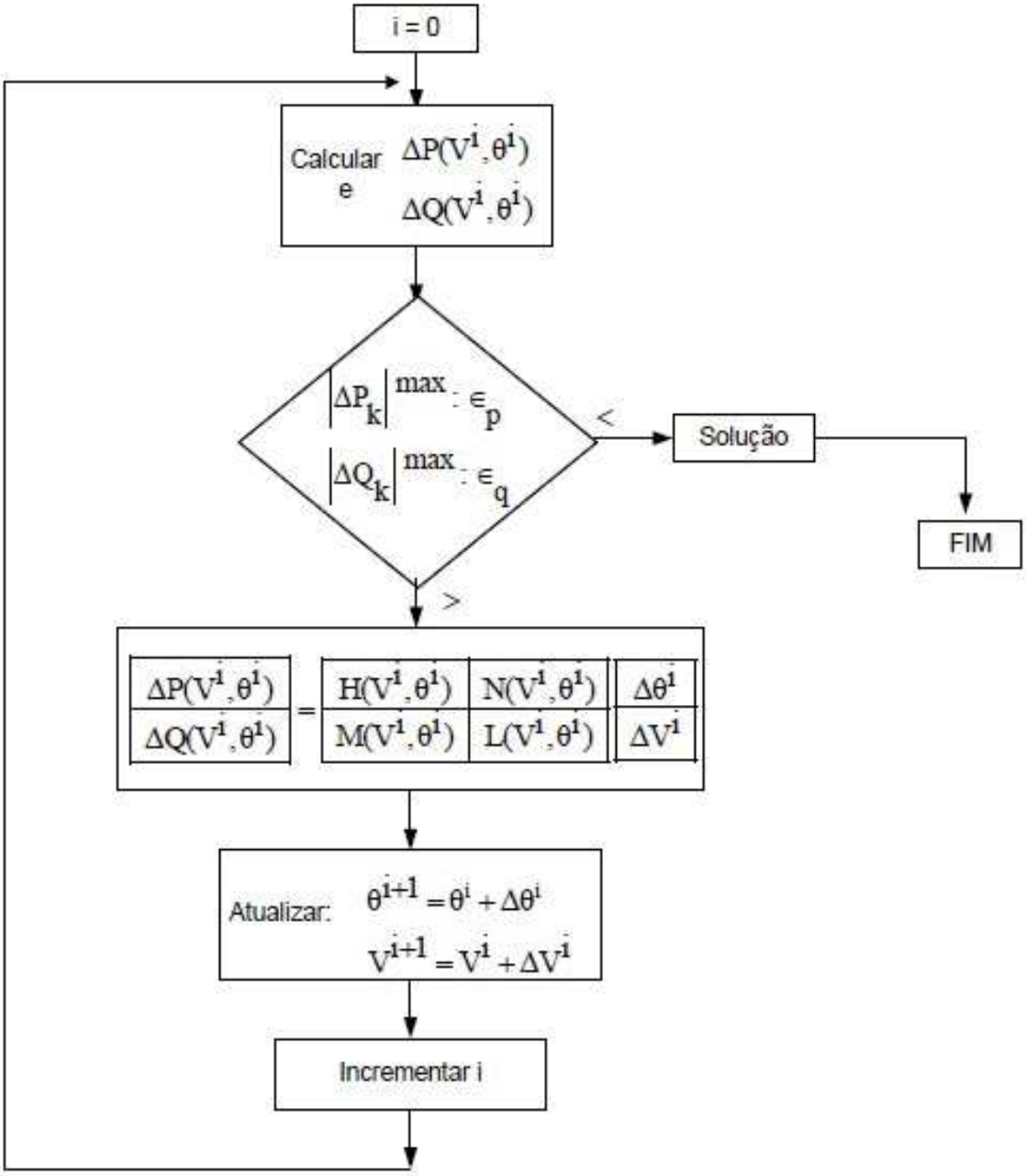
Tem-se que $k = 1 ... numero\ de\ barras$, $_k = conjunto\ de\ barras\ vizinhas$, V_k, V_m tensões das barras terminais; θ_k,θ_m ângulos das tensões nas barras, P_{km} fluxo de potência ativa e Q_{km} fluxo de potência reativa.

5.2.7 Método de Newton-Raphson

Segundo Alves (2007), o método de Newton-Raphson é o método com melhor desempenho para redes de transmissão, por conta de sua característica altamente convergente através do calculo utilizando o jacobiano do sistema elétrico. Por ser um sistema iterativo, é possível chegar aos valores finais de fluxo de potência a partir de um chute inicial. A Figura 9 representa o fluxograma do funcionamento do algoritmo.

Primeiramente, calculam-se os valores iniciais dos ângulos e tensões de PQ e PV. Em seguida, calcula-se a potência ativa para cada barra P_k e P_v, a potência reative de Q_k e os eventuais resíduos do sistema. Testa-se assim a convergência do valor, caso falhe o teste, continua-se o cálculo. Na etapa seguinte, calcula-se a matriz Jacobiana do sistema, a partir dos valores derivados de tensão e ângulo para assim determinar os parâmetros de incremento. Finalizados os cálculos dos novos parâmetros, incrementa-se o contador de iterações e recomeça-se o processo, qual se repetirá até que o valor estabilize e atinja a convergência.

Figura 9 – Fluxograma do algoritmo de Newton-Raphson para a solução de fluxo de potência



Fonte: Adaptado de Alves (2007)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção contém os resultados do trabalho apresentados sobre duas visões: a micro, onde são analisados os efeitos do ponto de vista interno da *microgrid* e macro, onde leva-se em consideração os efeitos da adoção da rede em diferentes graus.

6.1 Modelagem da *microgrid*

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através de simulações realizadas no software *Powerworld*, seguindo a metodologia proposta. Sendo assim, 24 simulações únicas foram realizadas para cada tipo de rede proposta: rede convencional, rede com geração distribuída e rede com geração distribuída com uso de gerador à combustão. No total foram 72 simulações independentes, com foco na análise do fluxo de potência ativa da rede e visualização do balanço energético.

Sendo assim, demonstra-se necessário expressar de forma quantitativa os dados referentes à modelagem do sistema, qual é composto pelos elementos expressados na Figura 10. Os elementos apresentados são:

- 4 x cargas de potência ativa, representando uma residência com padrões de demanda médio de Toledo, PR.
- 1 x gerador fotovoltaico
- 1 x gerador eólico
- 1 x gerador a diesel

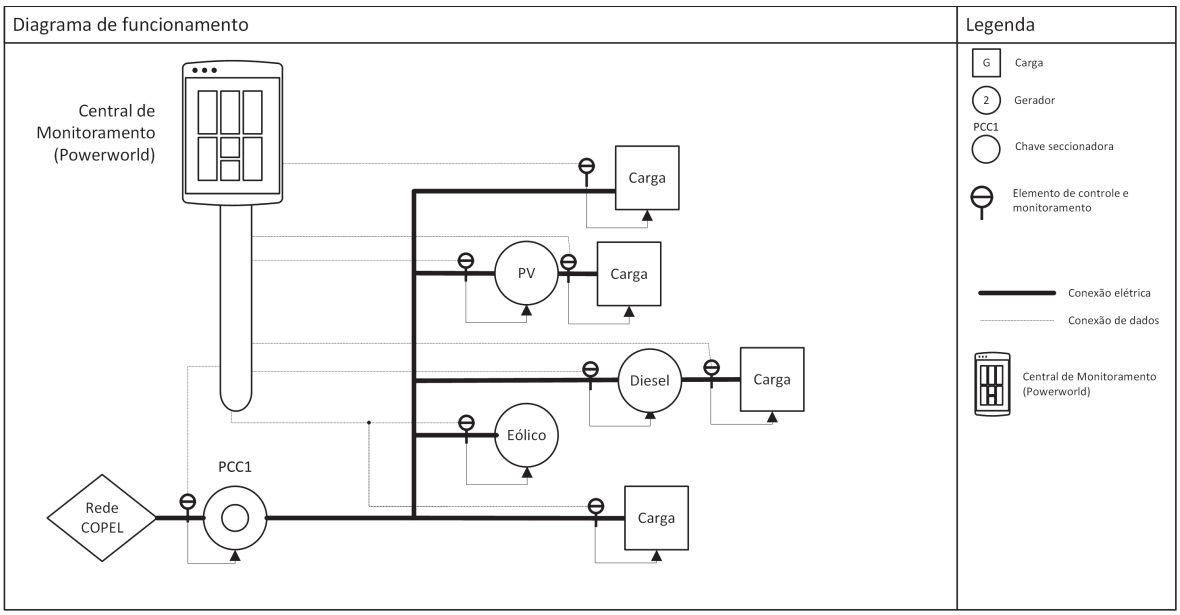
6.1.1 *Modelagem da carga Residencial*

A determinação da carga residencial será realizada em duas partes, uma que dita o comportamento da carga e a outra que expressa o comportamento médio de uma carga residencial média no estado do Paraná. Utilizando da combinação destes métodos obteve-se o comportamento da carga utilizada neste trabalho.

6.1.1.1 Definição do comportamento

Para que fosse possível uma simulação que representasse a variabilidade no comportamento e estabilidade, tanto por parte das fontes distribuídas, quanto das cargas, o presente trabalho baseia-se no perfil de demanda proposto por Geleta e Manshahia (2019).

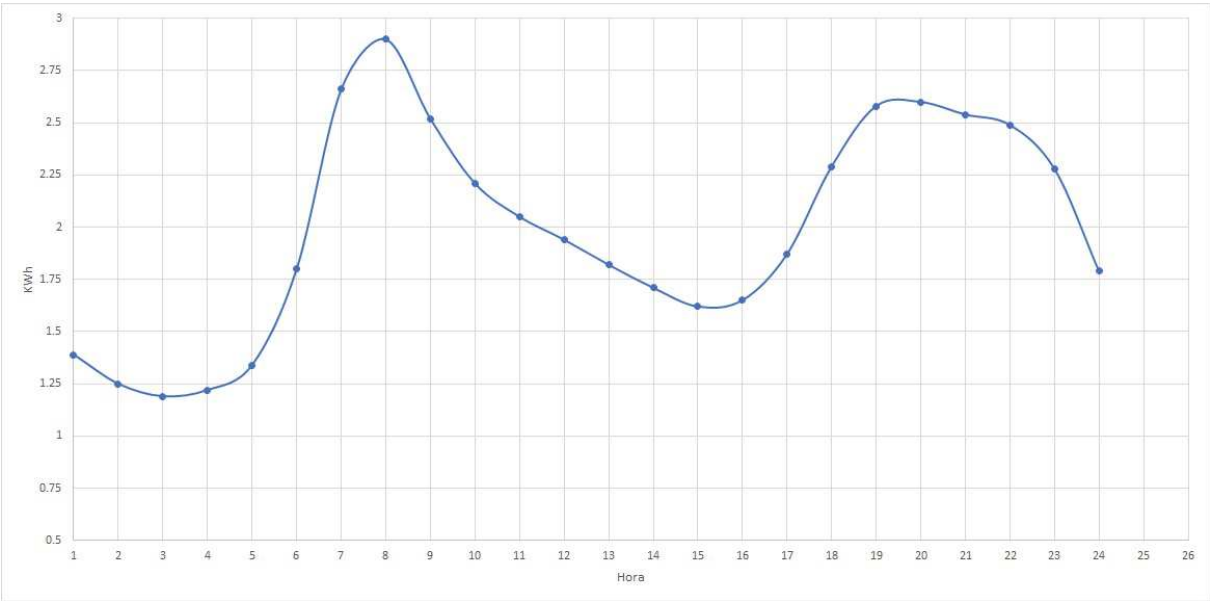
Figura 10 – Diagrama de conexão da *microgrid* proposta



Fonte: Diagrama próprio

O gráfico da Figura 11 representa o perfil citado e modela um período de 24 horas, com período amostragem $\Delta t = 1h$. Segundo o autor, o perfil representa a média da demanda horária aferida durante o período de um ano. Dessa forma, o comportamento proposto visa representar o consumo médio de uma residência durante o ano todo de operação (GELETA; MANSHAHIA, 2019).

Figura 11 – Curva horária de comportamento da demanda



Fonte: Adaptadado de Geleta e Manshahia (2019)

No gráfico da Figura 11 é possível verificar a demanda horária da residência medida pelos autores. Nota-se que no período das 1h às 5h da manhã quase não existe consumo, pois este é o período médio de sono em uma residência. Às 6h da manhã o consumo dobra, e permanece assim até o seu pico do dia, às 8h. A partir de então o consumo diminui gradativamente, mudando novamente seu comportamento por volta das 15h. Nesse período as pessoas começam a chegar em casa novamente, passam a utilizar seus eletrodomésticos. Das 15h até as 18h o crescimento é bem íngreme. À partir das 19h percebe-se um platô, horário de pico. Nesse período que correspondem a 3 horas, das 18h às 21h, o consumo quase não se altera. A partir das 21h o consumo começa a diminuir e às 24h, meia-noite, o consumo já torna-se baixo novamente.

6.1.1.2 Definição da carga diária

Em seguida, utilizando do Anuário Estatístico de Energia Elétrica Interativo foi possível extrair os dados referentes à demanda de energia elétrica no estado do Paraná. No período de 365 dias que compuseram o ano de 2017, 3,71 milhões de unidades consumidoras estavam ligadas à rede, que totalizaram 7.319 GWh consumidos. Sendo assim, diariamente essas unidades consumiam 20,1 milhões de KWh. Esses valores podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Informações do consumo de energia no Paraná em 2017

Entidade	Valor
Unidades consumidoras (Paraná)	3.71 milhões unidades
Gasto anual	7.319 milhões KWh
Gasto diário médio	20,1 milhões KWh

Fonte: Adaptado de EPE (2018)

A partir desses dados, pode-se obter o valor médio diário consumido por residência no estado do Paraná. A Equação 6 demonstra a operação realizada, onde se utiliza da demanda diário médio e divide-se pelo número de unidades consumidoras no estado do Paraná. O resultado é um valor médio de 5,41 KWh/dia para cada residência do estado.

$$\overline{Dem._{d,\ unidade}} = \frac{\overline{Dem._{d,\ PR}}}{Un.Cons._{PR}} = \frac{20{,}1\ *\ 10^6\ KWh}{3{,}71\ *\ 10^6} \approxeq 5{,}40\ KWh/dia \tag{6}$$

Seguindo, realiza-se a normalização da curva representada pela Figura 11 utilizando como base o valor da demanda média diária encontrado na Equação 6. Dessa forma foi possível modelar o comportamento diário proposto por Geleta e Manshahia (2019) aplicando o perfil de demanda média de uma residência no estado do Paraná. Para que isso seja possível, é realizada a operação descrita pela Equação 7, onde encontra-se a constante de normalização. Na Equação 8

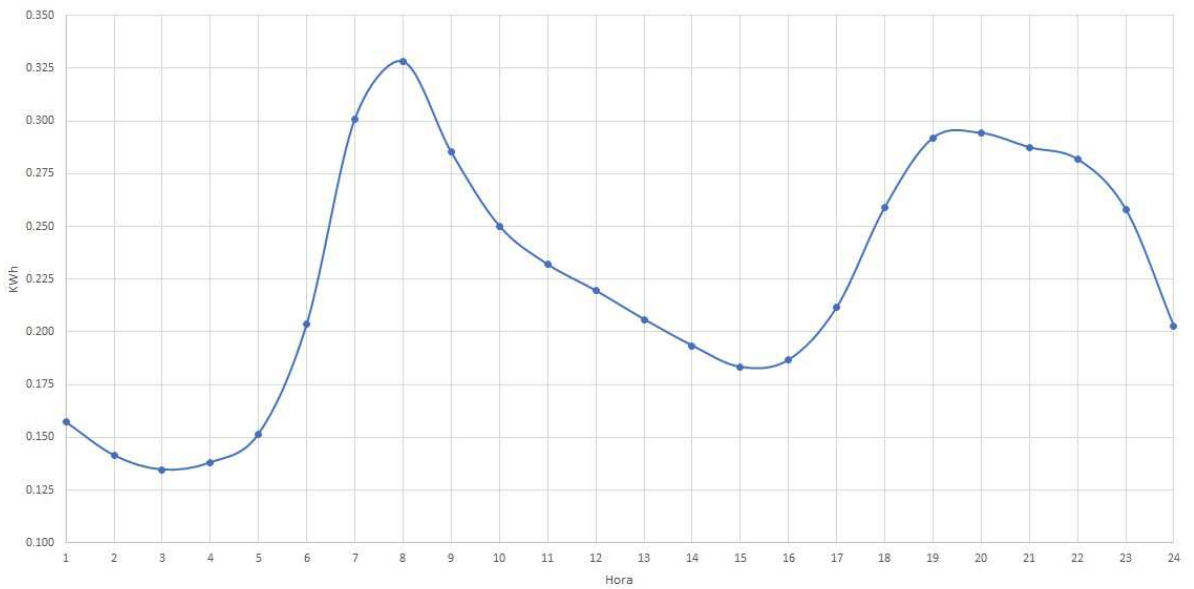
é possível ver o procedimento da operação. Aplica-se assim o procedimento às 24 horas do dia da Figura 11.

$$Cte_{normal.} = \frac{Dem._{d,\ proposto}}{Dem._{d,\ PR}} = \frac{47{,}71}{5{,}41} = 5{,}40 \tag{7}$$

$$Dem._{norm.} = \frac{Dem._{h,\ proposto}}{Cte_{normal.}} \tag{8}$$

O resultado da normalização está representado no gráfico da Figura 12, configurando assim o comportamento da residência utilizada na simulação. A residência, por ter característica de consumo de energia, será tratada como carga a partir deste momento.

Figura 12 – Curva horária de comportamento de demanda



Fonte: Autoria própria, baseado nos dados de Geleta e Manshahia (2019)

A *microgrid* proposta neste trabalho contém 4 cargas residenciais, como pode ser visto na Figura 10. Como as cargas encontram-se conectadas através de um ponto central, elas contribuem de forma aditiva para a demanda. Expressadas em períodos de 1h, a *microgrid* consome o equivalente a 4 vezes o valor horário de de demanda calculado, somando um total de 21,6 KWh de demanda em um dia.

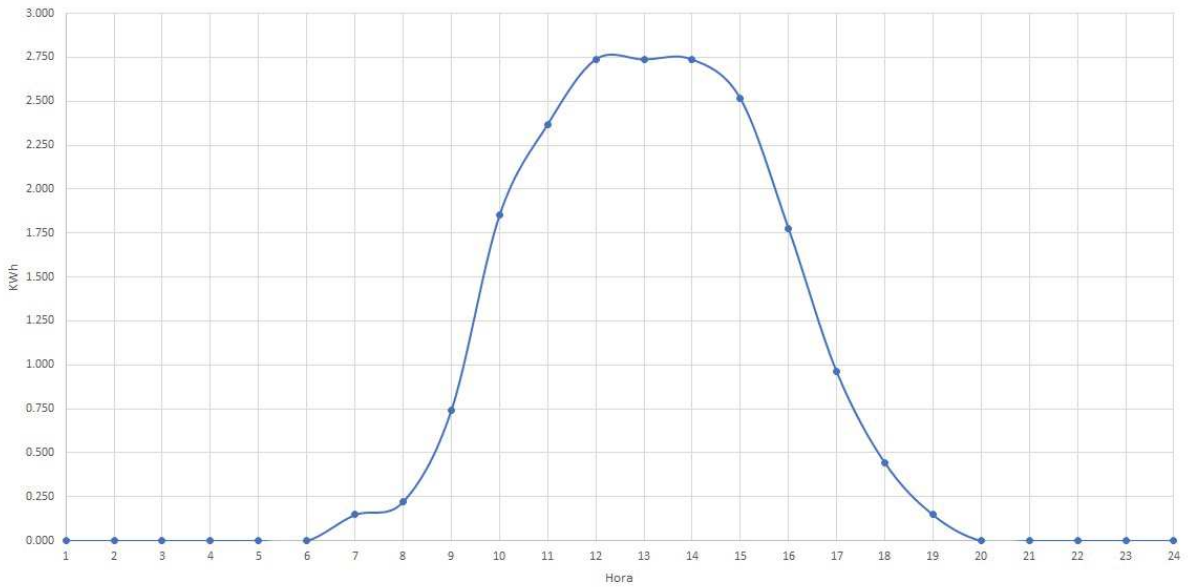
6.1.2 *Modelagem do gerador fotovoltaico*

Os valores utilizados para a modelagem do gerador fotovoltaico (FV) utilizado neste trabalho basearam-se no comportamento proposto por Geleta e Manshahia (2019). Na conclusão do seu trabalho, o autor justifica o uso de 74 células FV para cada gerador eólico em uma microgrid. A indicação do autor fora acatada e assim fora adotado o comportamento de 74 células FV para a microgrid do atual trabalho. Os motivos para a escolha deste arranjo foram:

- Em seu trabalho, Geleta e Manshahia (2019) puderam obter o valor ótimo para o uso concomitante de geradores FV e eólicos;
- Os valores apresentados têm comportamento semelhante a outros autores, como Kosmadakis, Karellas e Kakaras (2013) e Kaygusuz, Gül e Alagöz (2012);
- Segundo Sen e Kumar (2018) o esforço para a implementação de um sistema de modelagem que não fosse baseado em modelos estáticos ainda é muito elevado. Sendo assim, os modelos mais utilizados ainda hoje são os estáticos ou de valores médios obtidos experimentalmente. Este último é o caso do modelo adotado para o trabalho atual, o proposto por Geleta e Manshahia (2019).

Dessa forma, utilizando do comportamento proposto pode-se obter os valores horários de produção de energia fotovoltaica. Os valores constam na Tabela B, apresentada no Apêndice B. O comportamento da carga pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Curva horária de comportamento do gerador fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Geleta e Manshahia (2019)

O período que representa a madrugada, 1h às 6h da manhã, é marcado pela produção nula de energia, assim como após as 20h. Estes são os períodos que as placas fotovoltaicas não recebem irradiação solar. Por outro lado, o período entre às 7h às 19h é marcado pela produção de energia, seguindo a curva normal que representa o ciclo rotacional da Terra. Percebe-se um pico de produção entre as 12h e 13h, período qual o Sol posiciona-se aproximadamente a 90º da superfície das placas.

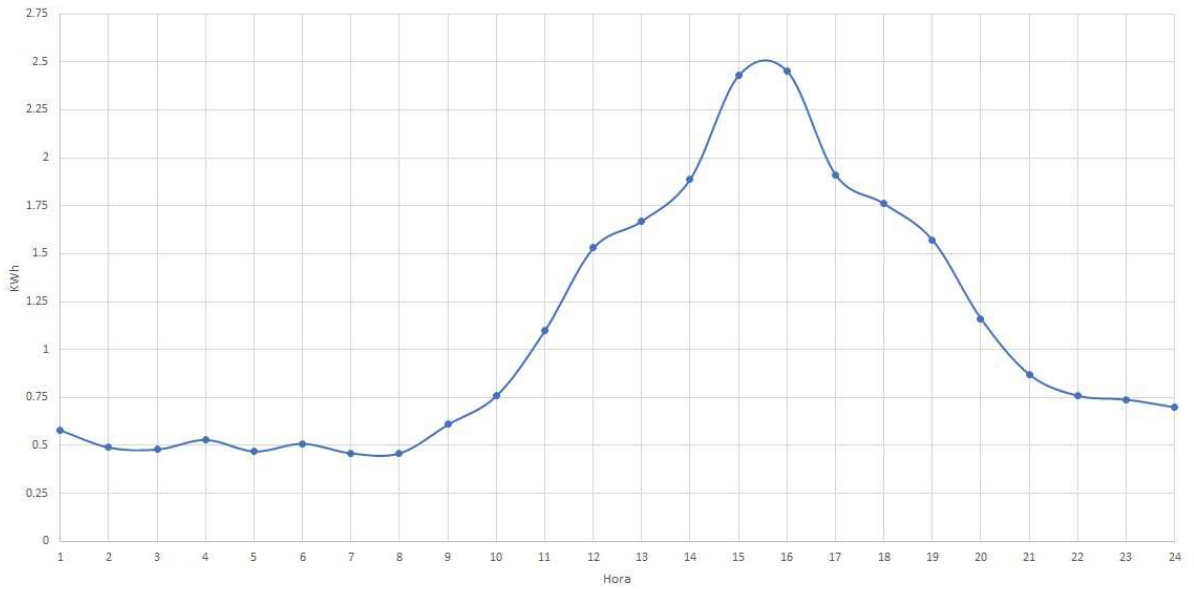
6.1.3 *Modelagem do gerador eólico*

Seguindo a mesma metodologia do gerador fotovoltaico, o modelo utilizado foi o proposto por Geleta e Manshahia (2019). No seu trabalho o autor propõe um modelo de gerador

baseado na amostragem horária da produção de energia de um gerador eólico, pautados na média ponderada de aferições horárias ao longo do período correspondente a um ano. Os valores sugeridos de produção podem ser visualizados na Figura 14.

A Figura 14 representa o período de 1 dia de produção eólica. O período das 1h às 8h da manhã é marcado pela ausência de vento, mantendo a produção bem próxima a zero. A partir das 9h da manhã a quantidade de energia começa a aumentar gradativamente, até atingir o seu topo por volta das 15h. Às 16h a produção começa a diminuir até que atinge o platô negativo, às 22h, permanecendo da mesma forma até as 8h da manhã seguinte.

Figura 14 – Curva horária de comportamento do gerador eólico



Fonte: Adaptado de Geleta e Manshahia (2019)

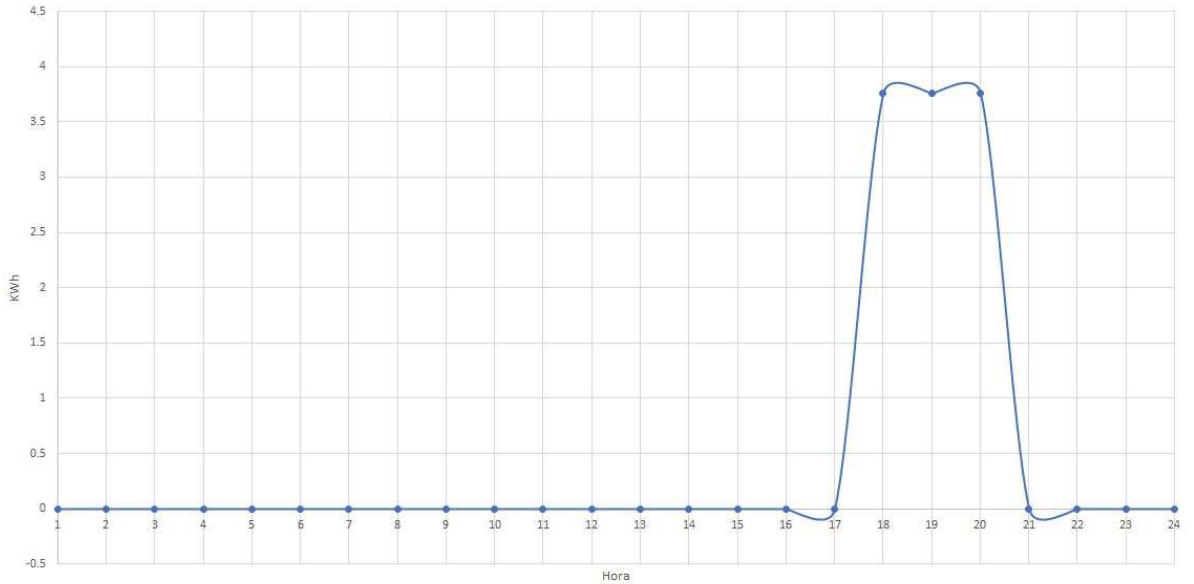
6.1.4 *Modelagem do gerador a diesel*

O gerador a diesel fora modelado Foi escolhido um modelo de gerador de pequeno porte (8 KVA), dado o tamanho da *microgrid*. Pela característica da simulação e análise, optou-se por modelar o gerador com a característica de potência constante de 3.76 KWh, representando o comportamento deste gerador operando em meia carga. Isso se deve pela escolha da estratégia de uso do gerador.

Uma vez que a operação de uma máquina como esta acarreta custos que não contribuem com o objetivo da *microgrid*, quais nesse caso seriam economias financeiras e ambientais, não é interessante fazer uso deste tipo de gerador termoelétrico por longos períodos de tempo. Levando em consideração os gastos com o combustível e a quantidade de energia produzida, o período de operação escolhido para o gerador foi o de horário de pico, ou seja, das 18h às 21h. Sendo assim, o gerador é apenas ligado no momento em que a tarifa sobre a demanda sofre um aumento significativo. Tal ação é uma estratégia de economia utilizada em empresas para a diminuição

das tarifas de energia, porém aqui aplicada em um contexto residencial. O comportamento do gerador pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Curva horária de comportamento do gerador a diesel



Fonte: Autoria prórpia

6.2 Simulação da *microgrid*

A simulação da microgrid foi realizada no software *Powerworld*, utilizando os modelos discutido nos itens anteriores deste capítulo. A Figura 6 é uma imagem do a *microgrid* proposta, enquanto a Figura 10 representa a estrutura da *microgrid* simulada, em sua forma final, com os elementos de simulação já definidos. Nesta sessão serão discutidos os processos envolvidos na simulação de cada variação da *microgrid*.

6.2.1 *O processo*

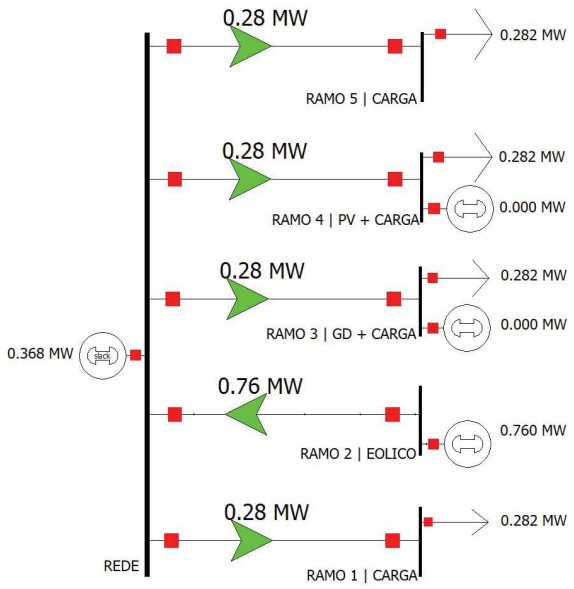
A *microgrid* proposta na Figura 6 contém todos os elementos da rede da Figura 10, com adição de uma bateria. Fora decidido retirar a bateria do processo de simulação por conta do tipo de conexão realizada com a rede. Optou-se por realizar a simulação do caso de **paralelismo permanente**, caso onde a rede geral, de fornecimento da COPEL, está sempre ligada à *microgrid*. Sendo assim, o processo que ocorre é o de "compra/venda"de energia. Perante este fato e não sendo parte do escopo deste trabalho os períodos transientes da simulação, a bateria fora retirada do escopo da simulação.

O processo de simulação proposto envolveu substituir os valores de cada elemento da *microgrid* no seu respectivo horário do dia. Para isso, os valores obtidos na modelagem foram dispostos em uma tabela contendo todos os valores horários de cada elemento da simulação. Estes

valores podem ser encontrados nas tabelas dos anexos A,B e C e seguem os comportamentos de demanda e geração apresentados na seção de modelagem deste capítulo.

Em seguida, criou-se o ambiente de simulação, alocando os valores da respectiva hora no simulador. Uma vez que os elementos estavam configurados, utilizou-se a ferramenta de solução de fluxo de potência através do algoritmo de *Newton-Raphson*. Iterativamente, o software de simulação *Powerworld* calcula os valores corretos de fluxo de potência da *microgrid*. A Figura 16 representa a visão de simulação de um dos períodos simulados.

Figura 16 – Ambiente de simulação utilizando o *Powerworld*



Fonte: Autoria própria

Uma vez convergidos, os valores de do fluxo de potência em cada linha de transmissão da *microgrid* ficavam disponíveis através de um relatório. A Figura 17 demonstra o relatório correspondente à simulação do ambiente da Figura 16. Uma vez gerado o relatório, esses dados eram então copiados para uma planilha no software *Microsoft Excel* para que pudessem ser analisados posteriormente.

Este processo representa um ciclo de simulação do trabalho. O fluxograma da Figura 8 indica o processo realizado. As simulações aconteceram em 3 cenários distintos:

1. Rede convencional, sem uso de geração distribuída
2. Rede convencional + geração distribuída
3. Rede convencional + geração distribuída + gerador diesel em horário de pico

Ao todo foram 72 ciclos (3x24h) de simulação para que fosse possível simular todas as condições, 24 horas, em cada um dos três cenários. Os valores simulados em cada uma das condições encontram-se nos Anexos A, B e C, respectivamente. As unidades consumidoras representam residências enquadradas na categoria B1, sendo esta considerada para as tarifas.

Figura 17 – Relatório de simulação do *Powerworld*

```
Bus Flows
BUS      1 REDE         138.0   MW    Mvar     MVA   % 1.0000   0.00   1 1
GENERATOR 1                  0.37   -0.00R    0.4
TO       2 RAMO 1 | CARGA 1     0.28   -0.00     0.3   0
TO       3 RAMO 2 | EOLICO 1    -0.76    0.00     0.8   0
TO       4 RAMO 3 | GD + CARGA 1     0.28   -0.00     0.3   0
TO       5 RAMO 4 | PV + CARGA 1     0.28   -0.00     0.3   0
TO       6 RAMO 5 | CARGA 1     0.28   -0.00     0.3   0

BUS      2 RAMO 1 | CARGA 138.0   MW    Mvar     MVA   % 1.0000  -0.00   1 1
LOAD 1                       0.28    0.00     0.3 DistGen    0.00    0.00     0.0
TO       1 REDE         1    -0.28    0.00     0.3   0

BUS      3 RAMO 2 | EOLICO 138.0   MW    Mvar     MVA   % 1.0000   0.00   1 1
GENERATOR 1                  0.76    0.00N    0.8
TO       1 REDE         1     0.76    0.00     0.8   0

BUS      4 RAMO 3 | GD + CARGA 138.0   MW    Mvar     MVA   % 1.0000  -0.00   1 1
GENERATOR 1                  0.00    0.00N    0.0
LOAD 1                       0.28    0.00     0.3 DistGen    0.00    0.00     0.0
TO       1 REDE         1    -0.28    0.00     0.3   0

BUS      5 RAMO 4 | PV + CARGA 138.0   MW    Mvar     MVA   % 1.0000  -0.00   1 1
GENERATOR 1                  0.00    0.00N    0.0
LOAD 1                       0.28    0.00     0.3 DistGen    0.00    0.00     0.0
TO       1 REDE         1    -0.28    0.00     0.3   0

BUS      6 RAMO 5 | CARGA 138.0   MW    Mvar     MVA   % 1.0000  -0.00   1 1
LOAD 1                       0.28    0.00     0.3 DistGen    0.00    0.00     0.0
TO       1 REDE         1    -0.28    0.00     0.3   0
```

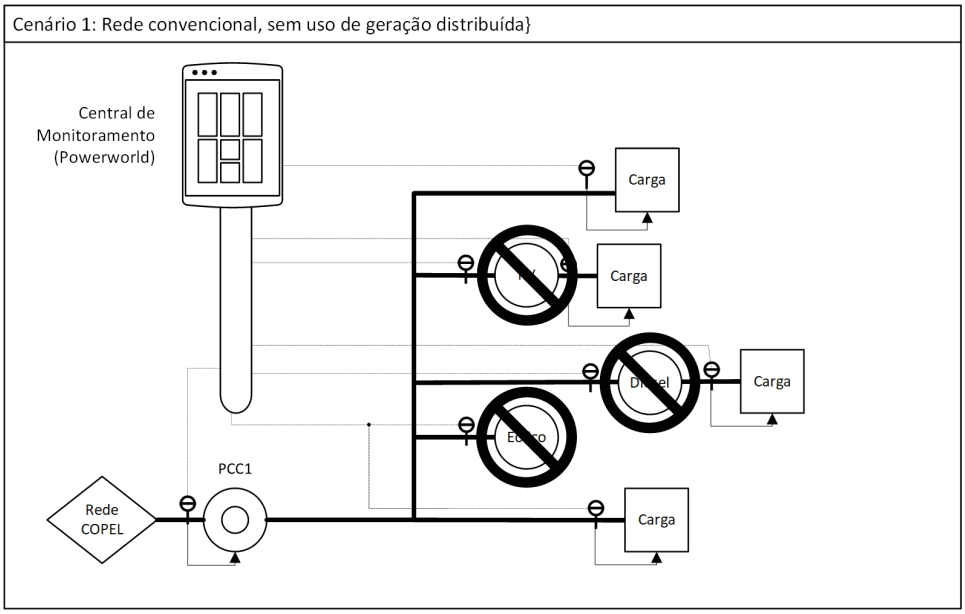
Fonte: Autoria própria

Nas próximas páginas serão discutidos cada um dos cenários individualmente, analisando seu comportamento e custo de operação.

6.2.2 *Cenário 1: Rede convencional, sem uso de geração distribuída*

Neste cenário, a simulação representa uma situação de fornecimento convencional de energia, em apenas um sentido: as unidades consumidoras (cargas) consomem energia da concessionária (COPEL). Nesta arquitetura, não há abatimento algum do valor de demanda, pois não existe geração de energia alternativa. A Figura 18 representa o esquema de funcionamento neste cenário.

Figura 18 – Diagrama do cenário 1: Rede convencional, sem uso de geração distribuída

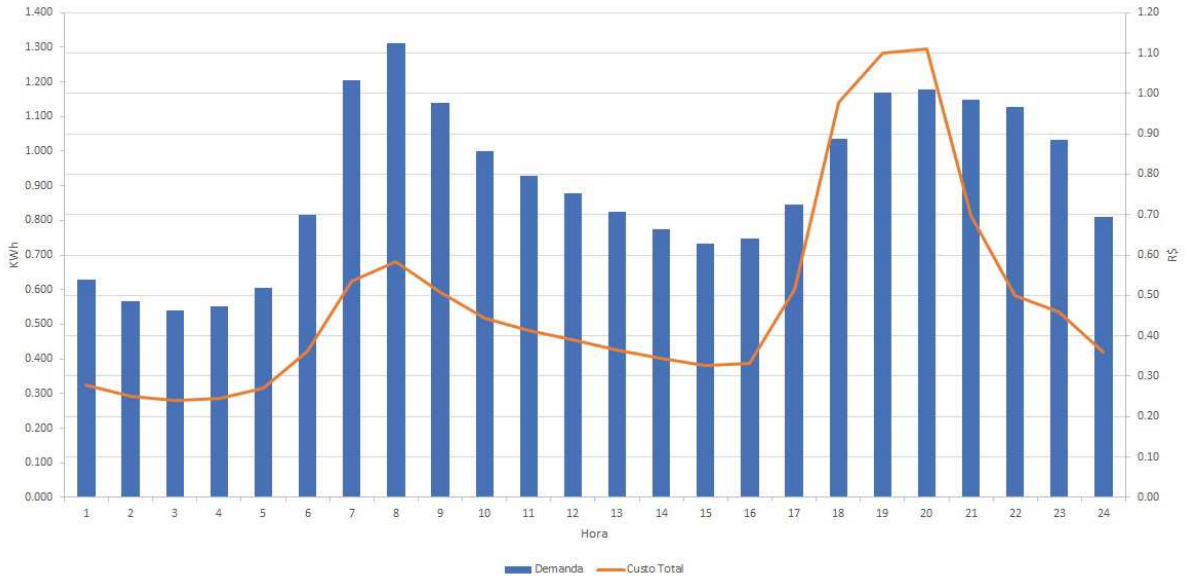


Fonte: Autoria própria

Os valores da simulação podem ser encontrados no Apêndice A, na Tabela 2. A tabela expressa os valores de cada um dos elementos da *microgrid* em cada um dos 24 casos de simulação, das 1h às 24h do dia. Os resultados da simulação são espressados pelos valores de linha de transmissão somados. Ao efetuar o balanço do fornecimento de energia com o consumo, o resultado sempre é zero. Isso se dá por conta do fato de não estarem sendo analisadas as perdas inerentes ao processo, em nenhum dos cenários de simulação. Este caso serve também de referência, pois neste toda a demanda é suprida pela rede da concessionária, que neste estudo de caso é a COPEL. A Figura 19 representa o relatório gráfico de simulação das entidades demanda horária e custo horário da rede no cenário.

Percebe-se a influência direta das cargas no comportamento da demanda, uma vez que elas são os únicos elementos da rede durante todo o processo de simulação. Um ponto interessante de se notar é que o pico de demanda das 8h da manhã está defasado referente ao pico de custo. Tal fato ocorre pela diferença no valor da tarifa cobrada pela concessionária de energia. No caso das 18h às 21h o valor da tarifa, 0,943 R$/KWh, é 2 vezes o valor normal de 0,444 R$/KWh. Tal fato encarece muito o valor da energia no período citado, chamado de "horas de pico". Este período é marcado pelo intenso uso de utensílios e aparelhos eletroeletrônicos,

Figura 19 – Relatório gráfico da simulação do cenário 1



Fonte: Autoria própria

aumentando a demanda da rede concessionada por todo o país. Para que possa haver uma diminuição do consumo e cobrir os gastos da manutenção e gerenciamento de energia, cobra-se a mais pelo KWh durante este período. Neste cenário de simulação os usuários das unidades consumidoras arcam com todos os custos integralmente. O custo total de operação no dia é de R$ 11,60

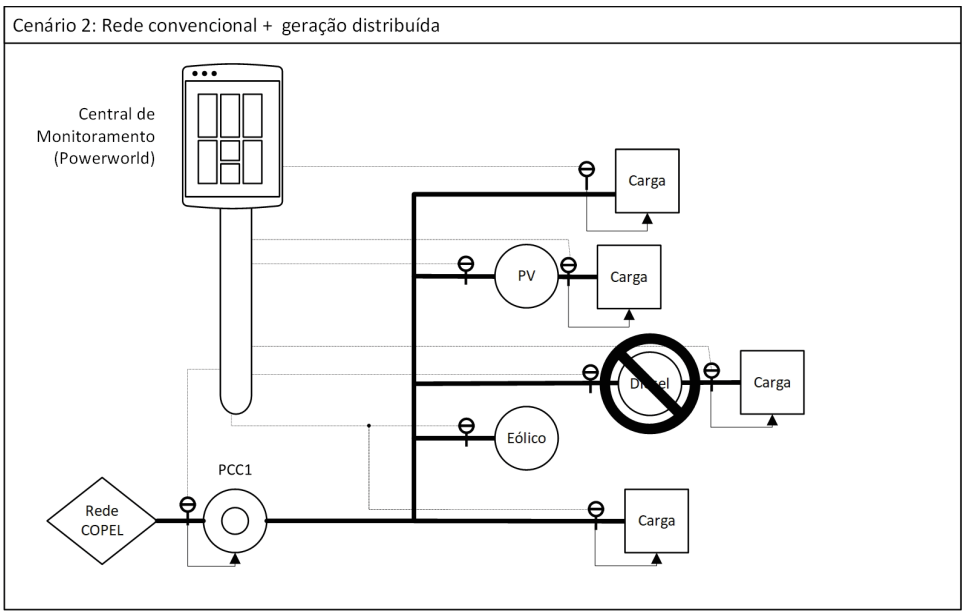
6.2.3 *Cenário 2: Rede convencional + geração distribuída*

Neste cenário, a simulação representa uma situação de fornecimento convencional de energia aliado à exploração das fontes de energia distribuída. Neste caso, o fluxo de energia é bidirecional na rede: ocorre consumo e fornecimento de energia para a rede concessionada. Ainda que as unidades consumidoras utilizem a energia primariamente, a energia sempre é vendida à concessionária, configurando o modo de paralelismo permanente. Nesta arquitetura, o valor final da demanda varia conforme as taxas de produção pois não existe geração de energia alternativa. A Figura 20 representa o esquema de funcionamento neste cenário.

Os valores da simulação podem ser encontrados no Apêndice B, na Tabela 3. A tabela expressa os valores de cada um dos elementos da *microgrid* em cada um dos 24 casos de simulação, das 1h às 24h do dia. Os resultados da simulação são espressados pelos valores de linha de transmissão somados, a valor a ser pago à concessionária (tarifa) e o custo total da operação. A Figura 21 expressa graficamente o relatório da simulaçãoes referentes ao cenário 2.

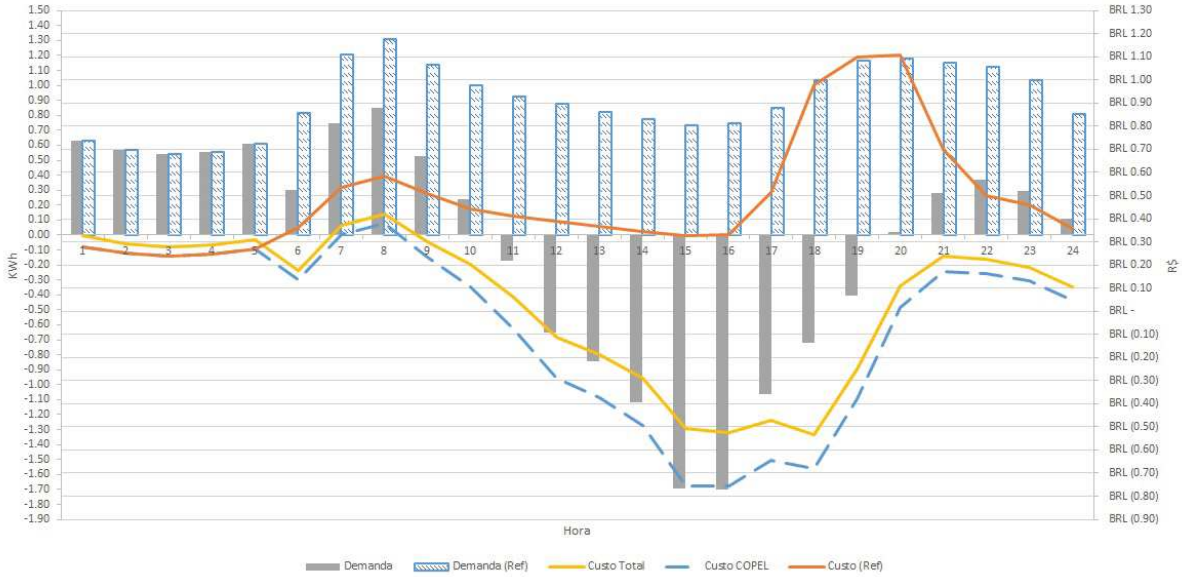
Percebe-se a influência direta das cargas no comportamento da demanda, porém desta vez atenuadas pelas fontes distribuídas eólica e fotovoltaica. O período das 1h às 5h da manhã o comportamento neste cenário é idêntico ao de referência, do ponto de vista de demanda (barras).

Figura 20 – Diagrama do cenário 2: Rede convencional + geração distribuída



Fonte: Autoria própria

Figura 21 – Relatório gráfico da simulação do cenário 2



Fonte: Autoria própria

Os custos por sua vez são pouco mais elevados, pois o custo de operação de uma *microgrid* inclui também sua manutenção. Os valores referentes à manutenção dos geradores eólico e fotovoltaico foram baseados nos valores sugeridos por Geleta e Manshahia (2019).

A partir das 6h os valores da demanda começam a diminuir, concomitante-mente com o período onde já há incidência de luz solar, enquanto o custo de operação fica negativo (linha amarela). Percebe-se a diferença dos valores de referência tanto para a demanda (barra vazada)

quanto para o custo (linha laranja). Em ambos os casos há impacto causado pelas fontes de geração distribuída. Às 7h da manhã ocorre um aumento na demanda, causado pelo despertar da população. Às 9h da manhã a demanda começa a diminuir e segue esse padrão até as 16h. Nesse período, a diferença de custo é expressiva (mais de R$ 7,00 de diferença), assim como a de demanda (barra cinza, quase 5 kWh de diferença).

A partir das 11h o custo passa a ser negativo, ou seja, é um período marcado pelo fornecimento de energia à rede. Esse fornecimento de energia soma negativamente ao custo, barateando a operação quando realizado o balanço diário, pois essa energia é "vendida"à concessionária. Isso indica que há mais produção de energia do que consumo. Percebe-se também que existe uma diferença mais expressiva entre o custo total e o custo da conta da copel. Essa diferença só não é maior graças aos custos de manutenção da *microgrid*. A diferença de custo tem o seu ponto máximo às 15h.

A partir das 16h o custo volta a aumentar, assim como a o balanço de demanda, uma vez que a incidência solar a produção eólica já não acompanham o aumento da demanda. Às 18h inicia-se o período pico, resultando em um aumento íngreme no custo. Visivelmente as fontes de energia alternativa auxiliam na manutenção do custo, visto a diferença no custo total quando comparado com a referência. Às 20h a demanda e o custo já são positivos novamente, pois não há mais incidência solar e a velocidade do vento já é bem menor (vide Figuras 13 e 14). O comportamento permanece semelhante até às 5h da manhã do dia seguinte. O custo total de operação ao fim do dia é de R$ 1,00 10 vezes menor do que a configuração anterior.

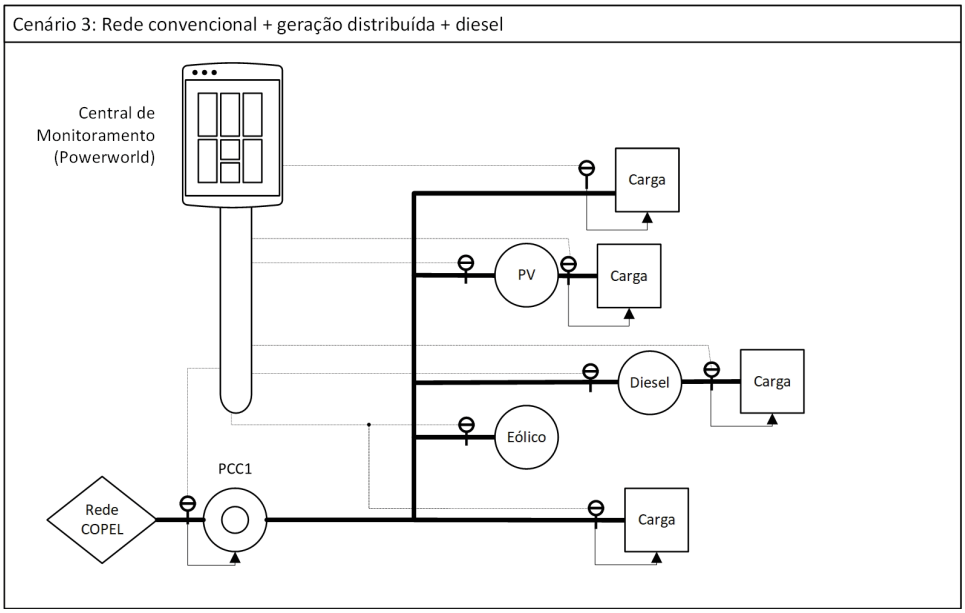
6.2.4 *Cenário 3: Rede convencional + geração distribuída + gerador a diesel*

Neste cenário, a simulação representa uma situação de fornecimento convencional de energia aliado à exploração das fontes de energia distribuída e o uso de um gerador à diesel no horário de pico. Assim como o caso anterior, o fluxo de energia é bidirecional e com paralelismo permanente. A Figura 22 representa o esquema de funcionamento neste cenário.

O comportamento da *microgrid* neste cenário é idêntico ao cenario 2, porém no horário de pico a dinâmica é diferente. Com o auxílio do gerador à diesel, é esperado um nível maior de produção de energia. A Figura 23 representa o relatório gráfico para este cenário.

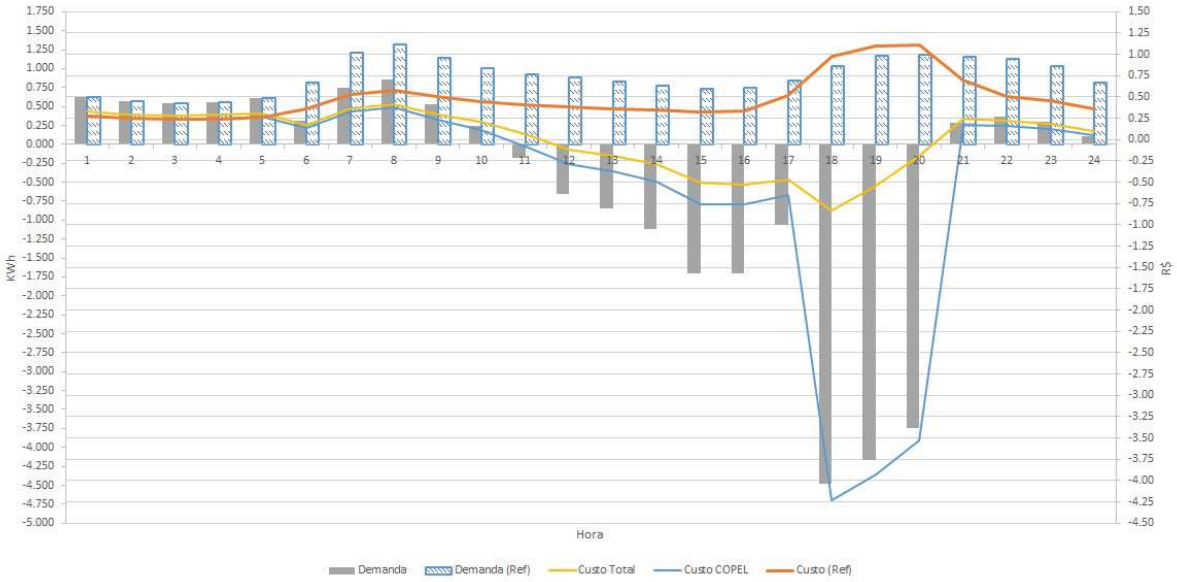
Logo no início é possível perceber as semelhanças com o cenário anterior, condição que permanece idêntica até às 18h. No início do horário de pico, o gerador à diesel é ligado e passa a fornecer energia à rede. A injeção é tão massiva que chega a bater 2 vezes a quantia do horário anterior. Veja que a diferença entre o custo total neste cenário e no cenário 2 se altera para pior, ou seja, fica levemente mais caro neste horário utilizar o gerador a diesel. A diferença se expressa nos períodos seguintes, pois a permanência nesse regime de consumo negativo e alta produção de energia faz com que a rede fique com saldo de custo negativo. A maior diferença é expressada no custo total, que cai para R$ 0,12 cerca de 10 vezes menor que o cenário anterior e quase 100 vezes menor do que o primeiro cenário.

Figura 22 – Diagrama do cenário 3: Rede convencional + geração distribuída + diesel



Fonte: Autoria própria

Figura 23 – Relatório gráfico da simulação do cenário 3



Fonte: Autoria própria

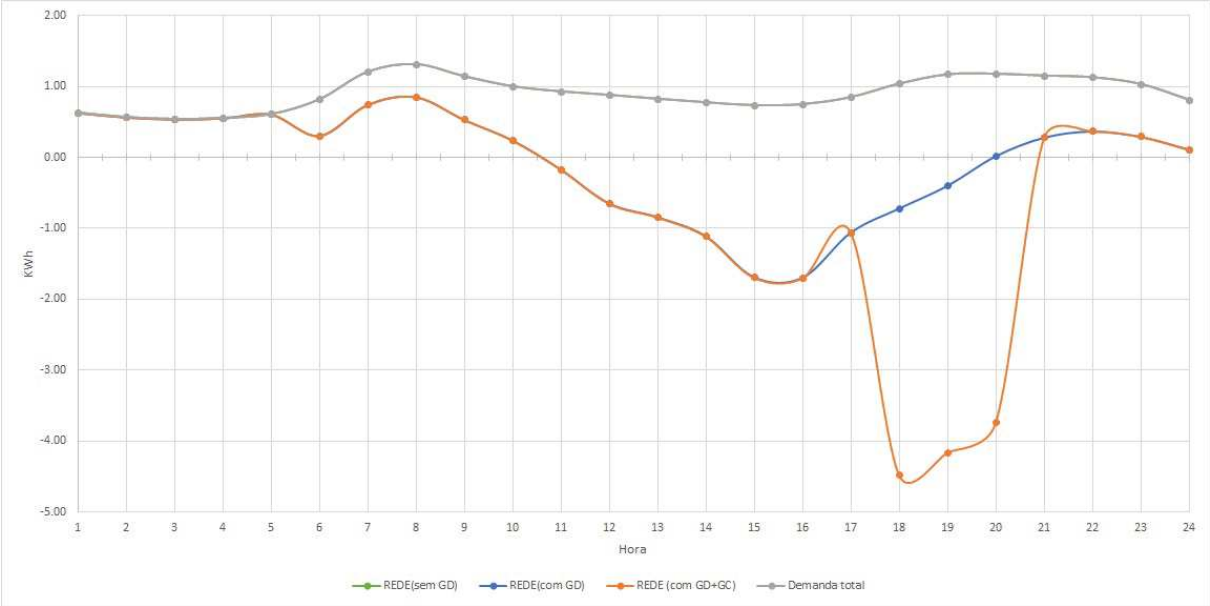
6.3 Análise geral e visão macro

As simulações demonstram a eficácia das fontes de energia alternativa no processo de manutenção de demanda em uma rede de pequeno porte. Os resultados da simulação do ponto de vista do balanço de energia horário pode ser visualizado na Figura 24. Nesta figura é possível observar o impacto da geração distribuída em uma rede. Percebe-se também a eficácia do gerador à diesel na diminuição da demanda. Porém, este último tem custos maiores de manutenção e produz poluentes, o que não o torna o caminho mais viável para a independência energética. Ainda assim, o papel de aliviar a rede no horário de pico fora cumprido com sucesso.

Na Figura 25 é possível ver o impacto no custo final da rede. Percebe-se que em sua grande parte do dia o custo do uso da rede com auxilio do gerador à combustão é semelhante ao do cenário sem o sua contribuição. Porém, no horário de pico é possível ver uma diminuição no custo total, mesmo levando em consideração o custo de operação do gerador à diesel. É importante frisar que essa diferença não parece grande para o consumidor final, porém para a concessionária ela é crítica.

Levando em consideração a dificuldade de realizar a manutenção da rede no período de pico, existe um aumento na tarifa, qual é repassado diretamente ao consumidor. No terceiro cenário não só esse custo não é repassado, mas como existe a situação oposta: a concessionária deve **pagar** à unidade consumidora. É neste ponto que a situação fica crítica. Porém, o caso estudado envolvia apenas 4 residências de pequeno porte.

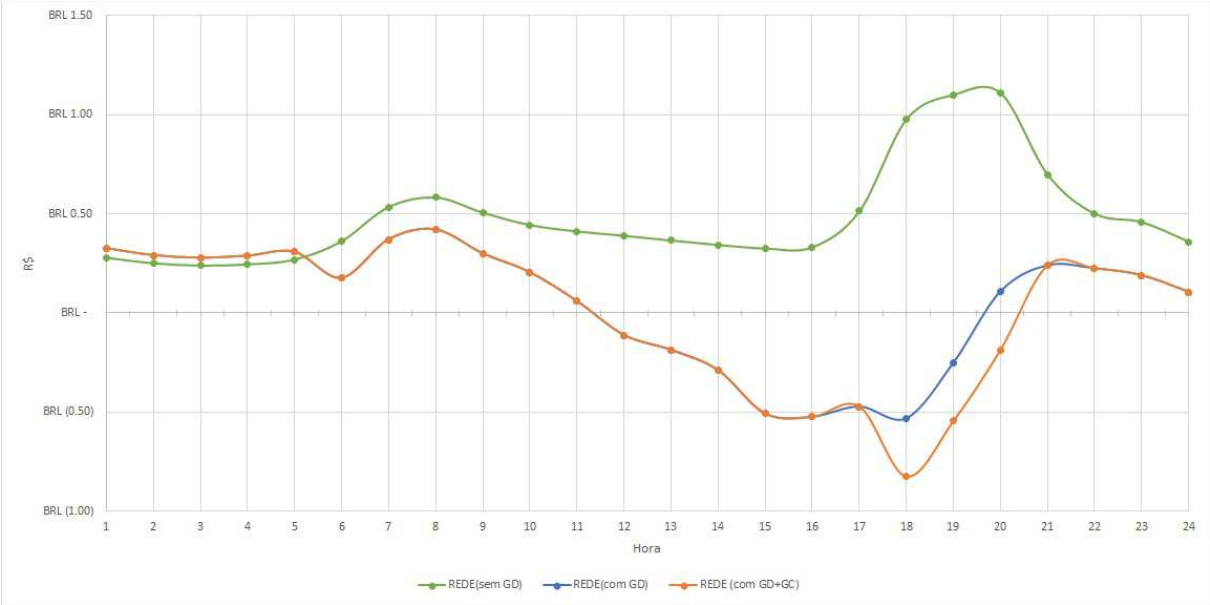
Figura 24 – Balanço de potência horário da *microgrid*



Fonte: Autoria própria

A análise seguinte leva em consideração a adoção da *microgrid* proposta por faixas de adoção de 0% a 100% no municipio de Toledo, Paraná. Para que tal análise pudesse ser realizada, foi realizada uma pesquisa no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), na

Figura 25 – Custo horário da *microgrid*)



Fonte: Autoria própria

Tabela 552, que informa a quantidade de residências nos municípios pesquisados. Para o último registro disponível, o município de Toledo continha 39.055 unidades residenciais. Baseando-se nesse valor e inferindo um agrupamento de 4 residências por *microgrid*, pode-se chegar no valor de 9.763,75 possíveis *microgrids* no município de Toledo. Esse valor e os valores diários dos cenários simulados serviram de base para a análise de adesão e impacto na concessionária de energia.

A Figura 26 representa o impacto causado à rede (em KWh) e à arrecadação da COPEL, com faixas de adesão que vão de 0% a 100%, representando a adesão das possíveis *microgrids* do município. A Tabela D, no Apêndice D, contém os dados que dão origem à Figura 26. Nela é possível verificar que a partir de 50% de adoção as unidades medidas tornam-se próximas a zero. As barras em laranja representam a *microgrid* sem o auxílio com gerador a diesel no horário de pico, enquanto as barras cinzas demonstram sua adoção. Perceb-ese que a adoção da estratégia de venda de energia no momento de pico injeta uma grande quantidade de energia no sistema, antecipando em pelo menos 30% o perfil negativo de fornecimento de energia por parte da concessionária.

Do ponto de vista energético, é um ótimo resultado, pois indica um alto índice de independência energética. Fator que autores da área de energia como Porsinger et al. (2016), Hayden (2013) e estudiosos da área de sustentabilidade, como Pisani (2006), consideram como fator positivo para o futuro. Em seu relatório de energias sustentáveis, BRASIL (2008) afirma que até 2050, cerca de 50% da quantidade de energia suprida será fruto de exploração de fontes de energia renováveis. Sendo assim, o resultado confirma-se sendo positivo.

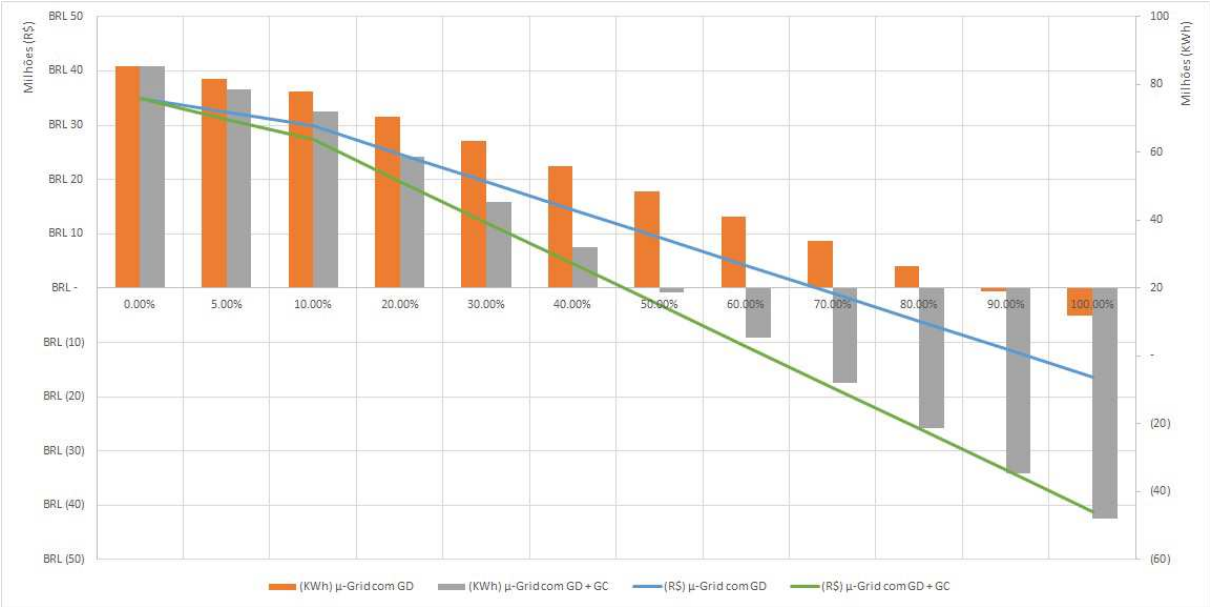
No entanto, do ponto de vista da arrecadação, a queda é tão expressiva que seria negativa

para a concessionária de energia. Ao invés de arracadar R$ 65 milhões, ela forneceria valor em crédito que ultrapassa os R$ 40 milhões. São mais de R$ 100 milhões de diferença para uma adoção completa da cidade, isso levando em consideração que o valor da arrecadação é referente a uma média da quantidade de unidades consumidoras residenciais na cidade de Toledo. Levando em consideração que a cidade de Toledo é de porte consideravelmente pequeno, outras cidades maiores já teriam aderido às mudanças energéticas que a facilidade de acesso e a melhoria das tecnologias proporcionam. Baseado nesses ponto a situação, do ponto de vista da arrecadação, é alarmante.

Segundo a COPEL (2017), na NTC 905100, a forma mais indicada de realizar a ligação de uma *microgrid* à rede é a de paralelismo permanente, condição qual este trabalho reproduz. Logo, há de se esperar que a adoção em massa da exploração de fontes renováveis de fácil acesso, como eólica e fotovoltaica, trará consequências para o sistema e mercado de energia elétrica brasileiro. Segundo Bajay et al. (2018), o aumento da adoção de práticas sustentáveis em escalas maiores trará consequências diretas para o consumidor na área. Isso se dá pelo fato de que a concessionária não arcará com o excedente de energia. Logo, esse valor que não foi vendido, será repassado para o consumidor diretamente, seja através do aumento das tarifas ou criação de novas, o fato é que o consumidor irá arcar com a conta de energia, seja a dele ou da concessionária. Adicionalmente, Bajay et al. (2018) cita também que da forma que as regulamentações ocorrem hoje é possível perceber que o elemento menos prejudicado na evolução energética é a concessionária. Tal fato se dá pois no Brasil as regras de produção independente de energia dizem que a concessionária é obrigada a fornecer crédito à unidade consumidora que produziu energia e injetou na rede a mesma já corretamente regulada e conformada aos padrões da concessionária. Porém, esse crédito tem validade de apenas 2 anos e é não apenas intransferível, é não liquidável senão através de uma ou mais contas com a mesma concessionária. Esse fator implica que ter uma baixa ou nenhuma demanda faz com que o consumidor acumule crédito, situação que nunca será liquidada, uma vez que este está em posição de produção. Logo, a concessionária hoje pode receber energia, não pagar por ela (fornecer crédito) e continuar cobrando as taxas que melhor lhe for conveniente.

Um contraponto importante é a Resolução 482, de 2012, que está sob análise. As mudanças propostas recentemente indicam alterações tanto no subsídio, quanto na tarifação da energia oriunda de fontes de energia distribuídas. Até a data deste trabalho, estuda-se a implantação de uma tarifa sobre a produção de energia, o que acarretará em mais custos para o produtor doméstico, encarecendo a operação e alongando o tempo para o retorno financeiro. Tal situação demonstra-se plausível, uma vez que as simulações indicam um perfil insustentável na arrecadação para o caso da adoção em larga escala, do ponto de vista da concessionária. Dada a necessidade de manter a soberania energética de uma ou mais regiões, a concessionária de energia é obrigada a operar em condições que não são sustentáveis nos casos supracitados. Desta forma, a intervenção governamental visando a regulação do futuro energético do país é imprescindível para garantir a operabilidade das malhas energéticas.

Figura 26 – Impacto na demanda e arrecadação por faixa de adesão



Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÃO

O primeiro cenário simulado demonstrava o comportamento de 4 residências diretamente ligadas à rede de distribuição da concessionária, sendo assim uma ligação de rede convencional, sendo que a demanda das residências era totalmente repassada à rede e cobrada de acordo. O segundo e o terceiro puderam demonstrar o comportamento de redes com a exploração de fontes energia alternativa, utilizando da geração distribuída para amenizar a carga da rede.

Os dois últimos cenários foram bem sucedidos no alívio da demanda total da rede e contribuindo positivamente com a diminuição da dependência energética da concessionária. Esta última afirmação pode ser considerada como uma característica virtual, uma vez que a conexão ocorria em regime de paralelismo permanente, reafirmando assim a interdependência dos elementos de geração distribuída e convencional. O segundo cenário proporcionou uma redução de de 108% na demanda e 113% no custo. Isso indica que não só diminuiu-se o custo, mas também que ele está negativo, ou seja trazendo "lucros".

O último cenário destaca a eficiência e impacto econômico do uso de estratégias alternativas de geração, visando obter lucro com a geração de energia em horário de pico. Neste caso, a simulação foi bem sucedida ao demonstrar que é possível reduzir ainda mais a conta de energia utilizando métodos que injetem mais energia na rede nos períodos onde as tarifas são mais elevadas, uma vez que a redução na demanda foi de 160%, enquanto no custo a redução foi ainda maior, 204%; Isso indica que a *microgrid* termina o dia de operação R$ 12,00 de crédito positivo.

Do ponto de vista energético, as *microgrids* não causam nenhuma dúvida quanto o seu impacto positivo. Já do ponto de vista econômico, sua adoção tem conotações ambíguas. Para o consumidor, é uma ótima forma de economizar e ajudar a diminuir o impacto gerado pela produção de carbono do país. No entanto, o ponto de vista da concessionária é preocupante. Isso se dá por conta das regras Brasileiras quanto à produção independente de energia, pois atualmente elas visam proteger o status econômico das concessionárias de energia. Caso as regulamentações não apoiassem o monopólio energético, as concessionárias estariam fadadas à falência com a adoção em massa da *microgrid* proposta, caso seu modelo de negócios permanecesse intacto. A diminuição radical na arrecadação seria o maior responsável, fazendo com que a balança econômica penda para o lado contrário do lucro das empresas.

Por fim, conclui-se que a *microgrid* proposta é capaz de contribuir positivamente na direção do aumento da resiliência e independência econômica de agregados habitacionais de pequeno porte, conciliando o investimento nos equipamentos e a economia gerada de maneira sustentável. Adicionalmente, é possível concluir que a adoção da exploração de energias alternativas é capaz de causar mudanças nos cenários econômicos e financeiros do mercado de energia do Paraná.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como forma de expansão e contribuição com o tema, seria de muita valia uma análise da adoção média ideal para que exista um ponto de equilíbrio entre demanda e fornecimento de energia, tanto por parte do consumidor quanto da concessionarias de energia. Isso se dá por conta da fraca regulamentação acerca *microgrids* e geração distribuída, demonstrando o quão defasadas as regulamentações Brasileiras estão frente a órgãos internacionais, como o IEEE.

Na área da melhoria, se faz interessante a melhoria dos modelos e a melhor documentação dos processos de modelagem, sendo este um déficit real na área de sistemas de potência em pequena escala como as *microgrids*.

Referências

ALVES, D. D. A. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia, UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica – Área de Conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência. p. 169, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 24.

ALZAHRANI, A. et al. Modeling and Simulation of Microgrid. **Procedia Computer Science**, v. 114, p. 392–400, 2017. ISSN 18770509. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050917318574>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.

ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

ARIF, A. et al. Load Modeling—A Review. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 6, p. 5986–5999, nov. 2018. ISSN 1949-3053, 1949-3061. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7917348/>. Citado na página 21.

BAJAY, S. et al. **Geração distribuída e eficiência energética: Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro**. [S.l.]: International Energy Initiative – IEI Brasil, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 5, 10, 11 e 41.

BRASIL, G. A caminho da sustentabilidade energética: como desenvolver um mercado de renováveis no brasil. **São Paulo**, 2008. Citado na página 40.

CHERP, A. et al. Comparing electricity transitions: A historical analysis of nuclear, wind and solar power in Germany and Japan. **Energy Policy**, v. 101, p. 612–628, fev. 2017. ISSN 03014215. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030142151630595X>. Citado na página 8.

COPEL. **NTC 905100: Acesso da rede de geração distribuída ao sistema da COPEL**. [S.l.]: COPEL, 2017. Citado na página 41.

DESHMUKH, M.; DESHMUKH, S. Modeling of hybrid renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 1, p. 235–249, jan. 2008. ISSN 13640321. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032106001134>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 20.

ELLER, A.; GAUNTLETT, D. **Energy Storage Trends and Opportunities in Emerging Markets**. [S.l.]: International Finance Corporation - World Bank Group, 2017. Citado na página 1.

EPE, E. d. P. E. A. Estatístico de energia elétrica 2017. 2017. 2018. Citado na página 27.

FREITAS, C. A. F. D. Software Baseado em MATLAB® para Cálculo e Análise Tridimensional de Campos Elétricos e Magnéticos em Linhas de Transmissão. 2017. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.22534.01603>. Citado na página 13.

FRIEDMAN, N. R. **Distributed Energy Resources Interconnection Systems: Technology Review and Research Needs**. [S.l.], 2002. NREL/SR–560–32459, 15001120 p. Disponível em: <http://www.osti.gov/servlets/purl/15001120-inIHDJ/native/>. Citado na página 12.

GELETA, D. K.; MANSHAHIA, M. S. Optimization of Hybrid Wind and Solar Renewable Energy System by Iteration Method. In: VASANT, P.; ZELINKA, I.; WEBER, G.-W. (Ed.). **Intelligent Computing & Optimization**. Cham: Springer International Publishing, 2019. v. 866, p. 98–107. ISBN 978-3-030-00978-6 978-3-030-00979-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-00979-3_10>. Citado 7 vezes nas páginas 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 36.

HANNA, R. et al. Evaluating business models for microgrids: Interactions of technology and policy. **Energy Policy**, v. 103, p. 47–61, abr. 2017. ISSN 03014215. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421517300101>. Citado na página 9.

HATZIARGYRIOU, N. (Ed.). **Microgrids: Architectures and Control**. [S.l.]: Wiley, IEEE Press, 2014. Citado na página 9.

HAYDEN, E. Introduction to Microgrids. p. 13, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 5, 9, 14 e 40.

HOSSAIN, E. et al. A Comprehensive Study on Microgrid Technology. v. 4, n. 4, p. 14, 2014. Citado na página 9.

KAYGUSUZ, A.; GÜL, O.; ALAGÖZ, B. Yenilenebilir dağınık üretim koşullarının güç sistemleri yük akış kararlılığına etkilerinin analizi/an analysis for impacts of renewable distributed generation conditions on the load flow stability of electrical power systems. **EMO Bilimsel Dergi**, v. 2, n. 4, p. 77–85, 2012. Citado na página 29.

KOSMADAKIS, G.; KARELLAS, S.; KAKARAS, E. Renewable and Conventional Electricity Generation Systems: Technologies and Diversity of Energy Systems. In: MICHALENA, E.; HILLS, J. M. (Ed.). **Renewable Energy Governance**. London: Springer London, 2013. v. 23, p. 9–30. ISBN 978-1-4471-5594-2 978-1-4471-5595-9. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-5595-9_2>. Citado na página 29.

LASSETER, R.; PAIGI, P. Microgrid: a conceptual solution. In: **2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)**. Aachen, Germany: IEEE, 2004. p. 4285–4290. ISBN 978-0-7803-8399-9. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1354758/>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15 e 16.

LOPES, Y.; FERNANDES, N. C.; MUCHALUAT-SAADE, D. C. Geração Distribuída de Energia: Desaos e Perspectivas em Redes de Comunicação. p. 55, 2015. Citado na página 3.

LV, T.; AI, Q. Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources. **Applied Energy**, v. 163, p. 408–422, fev. 2016. ISSN 03062619. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261915014294>. Citado na página 9.

MARIAM, L.; BASU, M.; CONLON, M. F. Microgrid: Architecture, policy and future trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 477–489, out. 2016. ISSN 13640321. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116302635>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 16.

MARNAY, C.; VENKATARAMANAN, G. Microgrids in the evolving electricity generation and delivery infrastructure. In: **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting**. Montreal, Que., Canada: IEEE, 2006. p. 5 pp. ISBN 978-1-4244-0493-3. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1709529/>. Citado na página 7.

OLIVER, J. et al. **Trends in global CO2 emissions - 2015 report**. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/284644287_Trends_in_Global_CO2_emissions_2015_report>. Citado na página 9.

PARHIZI, S. et al. State of the Art in Research on Microgrids: A Review. **IEEE Access**, v. 3, p. 890–925, 2015. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7120901/>. Citado na página 7.

PISANI, J. A. D. Sustainable development – historical roots of the concept. **Environmental Sciences**, v. 3, n. 2, p. 83–96, jun. 2006. ISSN 1569-3430, 1744-4225. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15693430600688831>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 40.

PORSINGER, T. et al. Component modelling for microgrids. In: **2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. Florence, Italy: IEEE, 2016. p. 1–5. ISBN 978-1-5090-2320-2. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7555869/>. Citado na página 40.

SEN, S.; KUMAR, V. Microgrid modelling: A comprehensive survey. **Annual Reviews in Control**, v. 46, p. 216–250, 2018. ISSN 13675788. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1367578818301068>. Citado na página 29.

SOUZA, E. C.; JOTA, P. R.; TAVARES, S. Estudo da ferramenta gridlab-d para simulação de microrredes. 2014. Citado na página 5.

Microgrid Institute. ***About Microgrids***. 2014. Citado na página 2.

United States Department of Energy. **DOE Microgrid Workshop Report**. [S.l.]: Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 8, 15 e 17.

ZHANG, C. et al. Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects. **Energy Procedia**, v. 105, p. 2563–2568, maio 2017. ISSN 18766102. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217308007>. Citado na página 9.

Apêndices

APÊNDICE A – Dados da *microgrid* sem geração distribuída

Tabela 2 – Dados da *microgrid* sem geração distribuída

Hora	Carga 1	Eolica	Diesel	Carga 2	PV x1	74	Carga 3	Carga 4	Casa	Eólica	Diesel + Casa	FV + Casa	Casa	COPEL	Tarifa	Conta Copel	Total
1	0.157	0.000	0.000	0.157	0.000	0.000	0.157	0.157	-0.157	0.000	-0.157	-0.157	-0.157	0.629	0.444	0.28	0.28
2	0.141	0.000	0.000	0.141	0.000	0.000	0.141	0.141	-0.141	0.000	-0.141	-0.141	-0.141	0.566	0.444	0.25	0.25
3	0.135	0.000	0.000	0.135	0.000	0.000	0.135	0.135	-0.135	0.000	-0.135	-0.135	-0.135	0.539	0.444	0.24	0.24
4	0.138	0.000	0.000	0.138	0.000	0.000	0.138	0.138	-0.138	0.000	-0.138	-0.138	-0.138	0.552	0.444	0.25	0.25
5	0.152	0.000	0.000	0.152	0.000	0.000	0.152	0.152	-0.152	0.000	-0.152	-0.152	-0.152	0.607	0.444	0.27	0.27
6	0.204	0.000	0.000	0.204	0.000	0.000	0.204	0.204	-0.204	0.000	-0.204	-0.204	-0.204	0.815	0.444	0.36	0.36
7	0.301	0.000	0.000	0.301	0.002	0.000	0.301	0.301	-0.301	0.000	-0.301	-0.301	-0.301	1.204	0.444	0.53	0.53
8	0.328	0.000	0.000	0.328	0.003	0.000	0.328	0.328	-0.328	0.000	-0.328	-0.328	-0.328	1.313	0.444	0.58	0.58
9	0.285	0.000	0.000	0.285	0.010	0.000	0.285	0.285	-0.285	0.000	-0.285	-0.285	-0.285	1.141	0.444	0.51	0.51
10	0.250	0.000	0.000	0.250	0.025	0.000	0.250	0.250	-0.250	0.000	-0.250	-0.250	-0.250	1.000	0.444	0.44	0.44
11	0.232	0.000	0.000	0.232	0.032	0.000	0.232	0.232	-0.232	0.000	-0.232	-0.232	-0.232	0.928	0.444	0.41	0.41
12	0.220	0.000	0.000	0.220	0.037	0.000	0.220	0.220	-0.220	0.000	-0.220	-0.220	-0.220	0.878	0.444	0.39	0.39
13	0.206	0.000	0.000	0.206	0.037	0.000	0.206	0.206	-0.206	0.000	-0.206	-0.206	-0.206	0.824	0.444	0.37	0.37
14	0.193	0.000	0.000	0.193	0.037	0.000	0.193	0.193	-0.193	0.000	-0.193	-0.193	-0.193	0.774	0.444	0.34	0.34
15	0.183	0.000	0.000	0.183	0.034	0.000	0.183	0.183	-0.183	0.000	-0.183	-0.183	-0.183	0.733	0.444	0.33	0.33
16	0.187	0.000	0.000	0.187	0.024	0.000	0.187	0.187	-0.187	0.000	-0.187	-0.187	-0.187	0.747	0.444	0.33	0.33
17	0.212	0.000	0.000	0.212	0.013	0.000	0.212	0.212	-0.212	0.000	-0.212	-0.212	-0.212	0.846	0.607	0.51	0.51
18	0.259	0.000	0.000	0.259	0.006	0.000	0.259	0.259	-0.259	0.000	-0.259	-0.259	-0.259	1.036	0.943	0.98	0.98
19	0.292	0.000	0.000	0.292	0.002	0.000	0.292	0.292	-0.292	0.000	-0.292	-0.292	-0.292	1.168	0.943	1.10	1.10
20	0.294	0.000	0.000	0.294	0.000	0.000	0.294	0.294	-0.294	0.000	-0.294	-0.294	-0.294	1.177	0.943	1.11	1.11
21	0.287	0.000	0.000	0.287	0.000	0.000	0.287	0.287	-0.287	0.000	-0.287	-0.287	-0.287	1.150	0.607	0.70	0.70
22	0.282	0.000	0.000	0.282	0.000	0.000	0.282	0.282	-0.282	0.000	-0.282	-0.282	-0.282	1.127	0.444	0.50	0.50
23	0.258	0.000	0.000	0.258	0.000	0.000	0.258	0.258	-0.258	0.000	-0.258	-0.258	-0.258	1.032	0.444	0.46	0.46
24	0.203	0.000	0.000	0.203	0.000	0.000	0.203	0.203	-0.203	0.000	-0.203	-0.203	-0.203	0.810	0.444	0.36	0.36
(24h)	5.399	0.000	0.000	5.399	0.262	0.000	5.399	5.399	-5.399	0.000	-5.399	-5.399	-5.399	21.594	-	BRL 11.60	BRL 11.60

APÊNDICE B – Dados da *microgrid* com geração distribuída

Tabela 3 – Dados da *microgrid* com geração distribuída

Hora	Carga 1	Eólica	Diesel	Carga 2	CPV x1	74	Carga 3	Carga 4	Casa	Eólica	Diesel + Casa	FV + Casa	Casa	COPEL	Tarifa	Man. PV	Man. Eólico	Conta Copel	Total
1	0.157	0.580	0.000	0.157	0.000	0.000	0.157	0.157	-0.157	0.000	-0.157	-0.157	-0.157	0.63	0.44426	BRL -	BRL 0.05	BRL 0.28	BRL 0.33
2	0.141	0.490	0.000	0.141	0.000	0.000	0.141	0.141	-0.141	0.000	-0.141	-0.141	-0.141	0.57	0.44426	BRL -	BRL 0.04	BRL 0.25	BRL 0.29
3	0.135	0.480	0.000	0.135	0.000	0.000	0.135	0.135	-0.135	0.000	-0.135	-0.135	-0.135	0.54	0.44426	BRL -	BRL 0.04	BRL 0.24	BRL 0.28
4	0.138	0.530	0.000	0.138	0.000	0.000	0.138	0.138	-0.138	0.000	-0.138	-0.138	-0.138	0.55	0.44426	BRL -	BRL 0.04	BRL 0.25	BRL 0.29
5	0.152	0.470	0.000	0.152	0.000	0.000	0.152	0.152	-0.152	0.000	-0.152	-0.152	-0.152	0.61	0.44426	BRL -	BRL 0.04	BRL 0.27	BRL 0.31
6	0.204	0.510	0.000	0.204	0.000	0.000	0.204	0.204	-0.204	0.510	-0.204	-0.204	-0.204	0.30	0.44426	BRL -	BRL 0.04	BRL 0.14	BRL 0.18
7	0.301	0.460	0.000	0.301	0.002	0.148	0.301	0.301	-0.301	0.460	-0.301	-0.301	-0.301	0.74	0.44426	BRL 0.00	BRL 0.04	BRL 0.33	BRL 0.37
8	0.328	0.460	0.000	0.328	0.003	0.222	0.328	0.328	-0.328	0.460	-0.328	-0.328	-0.328	0.85	0.44426	BRL 0.00	BRL 0.04	BRL 0.38	BRL 0.42
9	0.285	0.610	0.000	0.285	0.010	0.740	0.285	0.285	-0.285	0.610	-0.285	-0.285	-0.285	0.53	0.44426	BRL 0.01	BRL 0.05	BRL 0.24	BRL 0.30
10	0.250	0.760	0.000	0.250	0.025	1.850	0.250	0.250	-0.250	0.760	-0.250	-0.250	-0.250	0.24	0.44426	BRL 0.04	BRL 0.06	BRL 0.11	BRL 0.20
11	0.232	1.100	0.000	0.232	0.032	2.368	0.232	0.232	-0.232	1.100	-0.232	-0.232	-0.232	-0.17	0.44426	BRL 0.05	BRL 0.09	BRL (0.08)	BRL 0.06
12	0.220	1.530	0.000	0.220	0.037	2.738	0.220	0.220	-0.220	1.530	-0.220	-0.220	-0.220	-0.65	0.44426	BRL 0.05	BRL 0.12	BRL (0.29)	BRL (0.11)
13	0.206	1.670	0.000	0.206	0.037	2.738	0.206	0.206	-0.206	1.670	-0.206	-0.206	-0.206	-0.85	0.44426	BRL 0.05	BRL 0.13	BRL (0.38)	BRL (0.19)
14	0.193	1.890	0.000	0.193	0.037	2.738	0.193	0.193	-0.193	1.890	-0.193	-0.193	-0.193	-1.12	0.44426	BRL 0.05	BRL 0.15	BRL (0.50)	BRL (0.29)
15	0.183	2.430	0.000	0.183	0.034	2.516	0.183	0.183	-0.183	2.430	-0.183	-0.183	-0.183	-1.70	0.44426	BRL 0.05	BRL 0.19	BRL (0.75)	BRL (0.51)
16	0.187	2.450	0.000	0.187	0.024	1.776	0.187	0.187	-0.187	2.450	-0.187	-0.187	-0.187	-1.70	0.44426	BRL 0.04	BRL 0.20	BRL (0.76)	BRL (0.53)
17	0.212	1.910	0.000	0.212	0.013	0.962	0.212	0.212	-0.212	1.910	-0.212	-0.212	-0.212	-1.06	0.60704	BRL 0.02	BRL 0.15	BRL (0.65)	BRL (0.47)
18	0.259	1.760	0.000	0.259	0.006	0.444	0.259	0.259	-0.259	1.760	-0.259	-0.259	-0.259	-0.72	0.94276	BRL 0.01	BRL 0.14	BRL (0.68)	BRL (0.53)
19	0.292	1.570	0.000	0.292	0.002	0.148	0.292	0.292	-0.292	1.570	-0.292	-0.292	-0.292	-0.40	0.94276	BRL 0.00	BRL 0.13	BRL (0.38)	BRL (0.25)
20	0.294	1.160	0.000	0.294	0.000	0.000	0.294	0.294	-0.294	1.160	-0.294	-0.294	-0.294	0.02	0.94276	BRL -	BRL 0.09	BRL 0.02	BRL 0.11
21	0.287	0.870	0.000	0.287	0.000	0.000	0.287	0.287	-0.287	0.870	-0.287	-0.287	-0.287	0.28	0.60704	BRL -	BRL 0.07	BRL 0.17	BRL 0.24
22	0.282	0.760	0.000	0.282	0.000	0.000	0.282	0.282	-0.282	0.760	-0.282	-0.282	-0.282	0.37	0.44426	BRL -	BRL 0.06	BRL 0.16	BRL 0.22
23	0.258	0.740	0.000	0.258	0.000	0.000	0.258	0.258	-0.258	0.740	-0.258	-0.258	-0.258	0.29	0.44426	BRL -	BRL 0.06	BRL 0.13	BRL 0.19
24	0.203	0.700	0.000	0.203	0.000	0.000	0.203	0.203	-0.203	0.700	-0.203	-0.203	-0.203	0.11	0.44426	BRL -	BRL 0.06	BRL 0.05	BRL 0.10
24h	5.40	-25.89	0	5.398539608	0.000	-19.388	5.398539608	5.398539608	-	-	-	-	-	-1.75	-	BRL 0.39	BRL 2.07	BRL (1.46)	BRL 1.00

APÊNDICE C – Dados da *microgrid* com geração distribuída e diesel

Tabela 4 – Dados da *microgrid* com geração distribuída e geração a diesel

Hora	Carga 1	Eolica	Diesel	Carga 2	CPV x1	74	Carga 3	Carga 4	Casa	Eólica	Diesel + Casa	FV + Casa	Casa	COPEL	Tarifa	Man. PV	Man. Eólico	Man. Diesel	Conta Copel	Total
1	0.157	0.580	0.000	0.157	0.000	0.000	0.157	0.157	-0.157	0.000	-0.157	-0.157	-0.157	0.629	0.444	0.000	0.046	0	0.28	0.33
2	0.141	0.490	0.000	0.141	0.000	0.000	0.141	0.141	-0.141	0.000	-0.141	-0.141	-0.141	0.566	0.444	0.000	0.039	0	0.25	0.29
3	0.135	0.480	0.000	0.135	0.000	0.000	0.135	0.135	-0.135	0.000	-0.135	-0.135	-0.135	0.539	0.444	0.000	0.038	0	0.24	0.28
4	0.138	0.530	0.000	0.138	0.000	0.000	0.138	0.138	-0.138	0.000	-0.138	-0.138	-0.138	0.552	0.444	0.000	0.042	0	0.25	0.29
5	0.152	0.470	0.000	0.152	0.000	0.000	0.152	0.152	-0.152	0.000	-0.152	-0.152	-0.152	0.607	0.444	0.000	0.038	0	0.27	0.31
6	0.204	0.510	0.000	0.204	0.000	0.000	0.204	0.204	-0.204	0.510	-0.204	-0.204	-0.204	0.305	0.444	0.000	0.041	0	0.14	0.18
7	0.301	0.460	0.000	0.301	0.002	0.148	0.301	0.301	-0.301	0.460	-0.301	-0.301	-0.301	0.744	0.444	0.003	0.037	0	0.33	0.37
8	0.328	0.460	0.000	0.328	0.003	0.222	0.328	0.328	-0.328	0.460	-0.328	-0.328	-0.328	0.853	0.444	0.004	0.037	0	0.38	0.42
9	0.285	0.610	0.000	0.285	0.010	0.740	0.285	0.285	-0.285	0.610	-0.285	-0.285	-0.285	0.531	0.444	0.015	0.049	0	0.24	0.30
10	0.250	0.760	0.000	0.250	0.025	1.850	0.250	0.250	-0.250	0.760	-0.250	-0.250	-0.250	0.240	0.444	0.037	0.061	0	0.11	0.20
11	0.232	1.100	0.000	0.232	0.032	2.368	0.232	0.232	-0.232	1.100	-0.232	-0.232	-0.232	-0.172	0.444	0.047	0.088	0	-0.08	0.06
12	0.220	1.530	0.000	0.220	0.037	2.738	0.220	0.220	-0.220	1.530	-0.220	-0.220	-0.220	-0.652	0.444	0.055	0.122	0	-0.29	-0.11
13	0.206	1.670	0.000	0.206	0.037	2.738	0.206	0.206	-0.206	1.670	-0.206	-0.206	-0.206	-0.846	0.444	0.055	0.134	0	-0.38	-0.19
14	0.193	1.890	0.000	0.193	0.037	2.738	0.193	0.193	-0.193	1.890	-0.193	-0.193	-0.193	-1.116	0.444	0.055	0.151	0	-0.50	-0.29
15	0.183	2.430	0.000	0.183	0.034	2.516	0.183	0.183	-0.183	2.430	-0.183	-0.183	-0.183	-1.697	0.444	0.050	0.194	0	-0.75	-0.51
16	0.187	2.450	0.000	0.187	0.024	1.776	0.187	0.187	-0.187	2.450	-0.187	-0.187	-0.187	-1.703	0.444	0.036	0.196	0	-0.76	-0.53
17	0.212	1.910	0.000	0.212	0.013	0.962	0.212	0.212	-0.212	1.910	-0.212	-0.212	-0.212	-1.064	0.607	0.019	0.153	0	-0.65	-0.47
18	0.259	1.760	3.760	0.259	0.006	0.444	0.259	0.259	-0.259	1.760	3.501	-0.259	-0.259	-4.484	0.943	0.009	0.141	3.25	-4.23	-0.83
19	0.292	1.570	3.760	0.292	0.002	0.148	0.292	0.292	-0.292	1.570	3.468	-0.292	-0.292	-4.162	0.943	0.003	0.126	3.25	-3.92	-0.55
20	0.294	1.160	3.760	0.294	0.000	0.000	0.294	0.294	-0.294	1.160	3.466	-0.294	-0.294	-3.743	0.943	0.000	0.093	3.25	-3.53	-0.19
21	0.287	0.870	0.000	0.287	0.000	0.000	0.287	0.287	-0.287	0.870	-0.287	-0.287	-0.287	0.280	0.607	0.000	0.070	0	0.17	0.24
22	0.282	0.760	0.000	0.282	0.000	0.000	0.282	0.282	-0.282	0.760	-0.282	-0.282	-0.282	0.367	0.444	0.000	0.061	0	0.16	0.22
23	0.258	0.740	0.000	0.258	0.000	0.000	0.258	0.258	-0.258	0.740	-0.258	-0.258	-0.258	0.292	0.444	0.000	0.059	0	0.13	0.19
24	0.203	0.700	0.000	0.203	0.000	0.000	0.203	0.203	-0.203	0.700	-0.203	-0.203	-0.203	0.110	0.444	0.000	0.056	0	0.05	0.10
24h	5.399	-25.890	-11.280	5.399	-	-19.388	5.399	5.399	-	-	-	-	-	-13.026	-	0.388	2.071	9.75	-12.09	0.12

APÊNDICE D – Dados do impacto da adoção da *microgrid* por faixas de adesão

Tabela 5 – Impacto da adoção da *microgrid* por faixas de adesão

Arrecadação anual COPEL Toledo (R$)															
Configuração				Adoção das µ-Grids x Redução											
	Dia	Mês	Ano	0%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Sem GD	11.60377	348.1131	4177.357	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07	4.08E+07
Com GD	-1.45605	-43.6815	-524.178	4.08E+07	3.85E+07	3.62E+07	3.16E+07	2.70E+07	2.24E+07	1.78E+07	1.32E+07	8.65E+06	4.06E+06	-5.27E+05	-5.12E+06
Com GD +	-12.0904	-362.712	-4352.54	4.08E+07	3.66E+07	3.25E+07	2.41E+07	1.58E+07	7.47E+06	-8.55E+05	-9.18E+06	-1.75E+07	-2.58E+07	-3.42E+07	-4.25E+07
Consumo anual COPEL Toledo (KWh)															
Configuração				Adoção das µ-Grids x Redução											
	Dia	Mês	Ano	0%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Sem GD	21.59416	647.8248	7773.897	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07	7.59E+07
Com GD	-1.74584	-52.3752	-628.503	7.59E+07	7.18E+07	6.77E+07	5.95E+07	5.13E+07	4.31E+07	3.49E+07	2.67E+07	1.85E+07	1.03E+07	2.07E+06	-6.14E+06
Com GD +	-13.0258	-390.775	-4689.3	7.59E+07	6.98E+07	6.37E+07	5.16E+07	3.94E+07	2.72E+07	1.51E+07	2.89E+06	-9.28E+06	-2.14E+07	-3.36E+07	-4.58E+07

Fonte: Autoria própria