

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROJETO DE FIM DE CURSO

---

# Simulação e Controle de Cargas em Microrredes de Geração e Distribuição

---

*Autor:*

Vítor Seger Zeni

*Supervisor:*

Dr. James SMITH

*A thesis submitted in fulfilment of the requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy*

*in the*

Research Group Name

Departamento de Automação e Sistemas

July 2014

*“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration.”*

Nikola Tesla

## *Resumo*

O homem moderno se vê amplamente dependente de energia elétrica. Ao mesmo tempo, a sociedade vem desenvolvendo uma maior consciência ambiental e uma busca por meios mais eficientes de utilização de energia. Sendo assim, o sistema tradicional de geração centralizada se mostra ineficiente tanto do ponto de vista ambiental, como do ponto de vista da distribuição da energia gerada. Neste contexto, as *microgrids* aparecem como um paradigma novo de geração e distribuição de energia elétrica, propondo que os usuários finais utilizem localmente meios de microgeração, armazenamento de energia e ferramentas de controle. Apesar do barateamento dos equipamentos e da crescente adesão em outros países, no Brasil poucos projetos sobre microrredes figuram, tornando este projeto em ambientes residenciais pioneiro. Entre os problemas associados à implementação de uma microrrede está o de descarte de cargas e a administração das baterias. Este projeto visa estudar o comportamento dinâmico e estático do sistema em situações de falha e, a partir disto, propor estratégias de controle para o uso das baterias que sejam condizentes com as necessidades dos consumidores e que respeitem os limites de operação da microrrede.

## *Abstract*

The modern man is heavily reliable on electrical energy. At the same time, society has changed its posture concerning the environment, searching for new and more efficient methods for utilizing energy. With that in mind, the traditional centralized energy generation paradigm proves itself insufficient both from the environmental standpoint and from the energy distribution standpoint. In this context, the microgrids have begun showing up as a new standard for electrical energy generation and distribution, proposing that the end users utilize locally microgeneration, energy storage and control tools. Even though the equipment has become cheaper and an increasing number of microgrids are being deployed around the globe, in Brazil very few projects on the matter have appeared, making this project a pioneer in residential microgrids. Among the difficulties to overcome on the deployment of microgrids, is the load-shedding and battery management problem. This project aims to study both the dynamic and static behavior of the system when subject to faults and, based on that, propose strategies for the battery usage that are coherent with the consumer needs and that respect the operational limits of the microgrid.

## *Agradecimentos*

Agradeço a todos os meus colegas de trabalho no Centro de Energia Sustentável da CERTI pelo convívio e aprendizado durante este período de estágio e em especial a meu orientador, Cesare Quinteiro Pica, pela oportunidade e pelo apoio.

Agradeço também aos professores e alunos do INEP, em particular ao professor Marcelo Lobo Heldwein, pela orientação e pelos ensinamentos.

Por fim, agradeço aos meus amigos e a minha família, que estiveram comigo durante toda caminhada. Agradeço aos meus pais, Nelson e Claudete, pelo amor e carinho durante todos estes anos e agradeço a minha irmã, Bárbara, por me ajudar a “segurar as pontas” sempre que preciso.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>iv</b>
<b>Sumário</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Glossário</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 A matriz elétrica . . . . .	1
1.2 Alternativas . . . . .	3
1.3 Estrutura para Geração Distribuída . . . . .	4
1.3.1 Smart Grid . . . . .	4
1.3.2 Microrredes Inteligentes . . . . .	5
1.4 O Futuro . . . . .	6
1.5 Motivação e Objetivo . . . . .	6
1.6 Organização do trabalho . . . . .	7
<b>2 Descrição do Projeto</b>	<b>8</b>
2.1 Introdução . . . . .	8
2.2 Especificação do Projeto . . . . .	9
2.2.1 Componentes . . . . .	9
2.2.2 Controle . . . . .	11
2.3 Conclusão . . . . .	12
<b>3 Definindo o Problema</b>	<b>13</b>
3.1 Introdução . . . . .	13
3.2 O Descarte de Cargas . . . . .	13
3.3 Estratégias de Descarte . . . . .	14
3.3.1 Tempo máximo de operação . . . . .	15
3.3.2 Tempo mínimo garantido de operação . . . . .	15
3.3.3 Administração ótima baseada em previsões . . . . .	17

---

3.4	Conclusão . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Atividades no Projeto</b>	<b>20</b>
4.1	Introdução . . . . .	20
4.1.1	Simulação dinâmica de eventos da microrrede . . . . .	20
4.1.2	Algoritmos de controle de cargas . . . . .	21
4.1.3	Escolha de tecnologias . . . . .	21
4.2	Tarefas realizadas . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Modelos Utilizados nas Simulações Dinâmicas</b>	<b>22</b>
5.1	Objetivo . . . . .	22
5.2	Funcionamento . . . . .	23
5.3	Modelos das fontes . . . . .	23
5.3.1	Painéis fotovoltaicos . . . . .	23
5.3.2	Rede principal e interfaceamento . . . . .	25
5.4	Modelos das cargas . . . . .	25
5.4.1	Cargas de potência constante . . . . .	26
5.4.2	Cargas de potência variável . . . . .	26
5.5	Bancos de baterias . . . . .	27
5.5.1	Células . . . . .	27
5.5.2	Conversor . . . . .	28
5.6	Outros aspectos . . . . .	28
5.6.1	Divisão de Potência . . . . .	29
5.6.2	Divisão de potência pela frequência de geração . . . . .	29
5.6.3	Impedância virtual . . . . .	30
5.6.4	Linhas de transmissão . . . . .	31
5.6.5	<i>Loops</i> algébricos . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Sistema de Descarte de Cargas: Projeto e Implementação</b>	<b>32</b>
6.1	Objetivo . . . . .	32
6.2	Projeto do Gerenciador . . . . .	33
6.2.1	Tempo mínimo garantido de operação . . . . .	33
6.2.2	Administração ótima baseada em previsões . . . . .	34
6.3	Implementação do Gerenciador . . . . .	37
6.3.1	Simulador da microrrede . . . . .	38
6.3.2	Ferramentas e tecnologias . . . . .	39
6.3.3	Estratégias de operação . . . . .	41
6.4	Conclusão . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Estudo e Análise de Tecnologias Disponíveis</b>	<b>44</b>
7.1	Introdução . . . . .	44
7.2	Tecnologias disponíveis . . . . .	44
7.2.1	Pluzzy . . . . .	45
7.2.2	Home Energy Management Suite . . . . .	45
7.2.3	Smart Home . . . . .	46
7.2.4	Wiser Home Management System . . . . .	46
7.3	Comparação entre os produtos . . . . .	47
7.4	Conclusão . . . . .	48

---

<b>8</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
8.1	Introdução . . . . .	49
8.2	Simulações Dinâmicas da Microrrede . . . . .	49
8.2.1	Chaveamento de Carga . . . . .	49
8.2.2	Queda da rede . . . . .	50
8.2.3	Caso misto . . . . .	52
8.3	Sistema de Descarte de Cargas . . . . .	54
8.3.1	Modo de tempo máximo de operação . . . . .	55
8.3.2	Modo de tempo mínimo de operação . . . . .	56
8.3.3	Modo ótimo baseado em previsões . . . . .	57
<b>9</b>	<b>Conclusões e Perspectivas futuras</b>	<b>60</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>62</b>



# Lista de Figuras

1.1	Demanda global de energia . . . . .	2
1.2	Receita do mercado de microrredes até 2020 . . . . .	6
2.1	Esquema da microrrede com legenda . . . . .	12
3.1	Tempo Mínimo de Operação: SoC . . . . .	16
3.2	Administração Ótima: SoC . . . . .	18
5.1	Implementação dos PVs . . . . .	23
5.2	Modelo dos Inversores . . . . .	24
5.3	Implementação dos Inversores . . . . .	24
5.4	Implementação da rede principal . . . . .	25
5.5	Implementação das Cargas de P Variável . . . . .	27
5.6	Conjunto Células Conversor . . . . .	28
5.7	Curvas de <i>Droop</i> . . . . .	30
5.8	<i>Loop</i> algébrico . . . . .	31
6.1	KiBaM . . . . .	35
6.2	Objetos <i>Components</i> . . . . .	38
6.3	Setup da simulação . . . . .	40
6.4	Objetos <i>Load Manager</i> . . . . .	42
7.1	Produto Pluzzy . . . . .	45
7.2	Produto Energate . . . . .	45
7.3	Produto Smart Home . . . . .	46
7.4	Produto Wiser . . . . .	47
8.1	Chaveamento: Potência Ativa . . . . .	50
8.2	Chaveamento: SoC . . . . .	51
8.3	Queda da rede: Potência Ativa . . . . .	52
8.4	<i>Set-points</i> de potência da bateria . . . . .	53
8.5	Caso misto: Potência Ativa . . . . .	53
8.6	Caso misto: Distribuição . . . . .	54
8.7	Modo de tempo máximo de operação . . . . .	55
8.8	Modo de tempo mínimo garantido de operação: caso 1 . . . . .	56
8.9	Modo de tempo mínimo garantido de operação: caso 2 . . . . .	57
8.10	Modo ótimo baseado em previsões: caso 1 . . . . .	58
8.11	Modo ótimo baseado em previsões: caso 2 . . . . .	58

# Glossário

<b>AMI</b>	<b>A</b> dvanced <b>M</b> etering <b>I</b> nfrastructure
<b>CA</b>	<b>C</b> orrente <b>A</b> lternada
<b>CC</b>	<b>C</b> orrente <b>C</b> ontínua
<b>CERTI</b>	<b>C</b> entros de <b>R</b> eferência em <b>T</b> ecnologias <b>I</b> novadoras
<b>CES</b>	<b>C</b> entro de <b>E</b> nergia <b>S</b> ustentável
<b>COELCE</b>	<b>C</b> ompanhia <b>E</b> nergética do <b>C</b> eará
<b>Copel</b>	<b>C</b> ompanhia <b>P</b> aranaense de <b>E</b> nergia
<b>FM</b>	<b>F</b> requency <b>M</b> odulation
<b>GD</b>	<b>G</b> eração <b>D</b> istribuída
<b>INEP</b>	<b>I</b> nstituto de <b>E</b> letrônica de <b>P</b> otência
<b>IP</b>	<b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
<b>KiBaM</b>	<b>K</b> inetic <b>B</b> attery <b>M</b> odel
<b>PCH</b>	<b>P</b> equena <b>C</b> entral <b>H</b> idrelétrica
<b>PDE</b>	<b>P</b> lano <b>D</b> ecenal de <b>E</b> xpansão de <b>E</b> nergia
<b>PIB</b>	<b>P</b> roduto <b>I</b> nterno <b>B</b> ruto
<b>PLC</b>	<b>P</b> rogramador <b>L</b> ógico <b>P</b> rogramável
<b>SCADA</b>	<b>S</b> upervisory <b>C</b> ontrol and <b>D</b> ata <b>A</b> cquisition
<b>SIN</b>	<b>S</b> istema <b>I</b> nterligado <b>N</b> acional
<b>SoC</b>	<b>S</b> tate of <b>C</b> harge
<b>tep</b>	toneladas equivalentes de <b>p</b> etróleo
<b>USB</b>	<b>U</b> niversal <b>S</b> erial <b>B</b> us

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 A matriz elétrica

A energia elétrica é, entre as formas secundárias, a que mais permeia a nossa vida, estando presente em quase todos os usos energéticos dos consumidores finais, sendo certamente um fator decisivo no desenvolvimento e bem-estar da nossa sociedade. Isto é notável ao se tomar o período de 1973-2010, quando se observou que, para um aumento médio de 3,2% no PIB mundial, o consumo de energia elétrica subiu 3,5%, ao mesmo tempo que o consumo de energia total aumentou apenas 2%<sup>[1]</sup>.

Em 2011, o consumo de energia mundial total foi de cerca de 13 bilhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo), sendo em torno de 81% provenientes de combustíveis fósseis, totalizando aproximadamente 31 bilhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> <sup>[2]</sup>.

Não é novidade também que a sociedade se preocupa de forma crescente com uma melhor utilização dos recursos naturais, com a redução dos danos ambientais - muitas vezes decorrentes da obtenção de energia elétrica, como a construção de novas usinas que geram grande impacto - e certamente com o efeito estufa, impulsionado em larga escala pela queima de combustíveis fósseis.

Sendo assim, alternativas aos meios convencionais de geração de energia estão sendo estudados desde já e vêm tomando forma, visando evitar um déficit de energia elétrica no mundo e garantir o desenvolvimento.

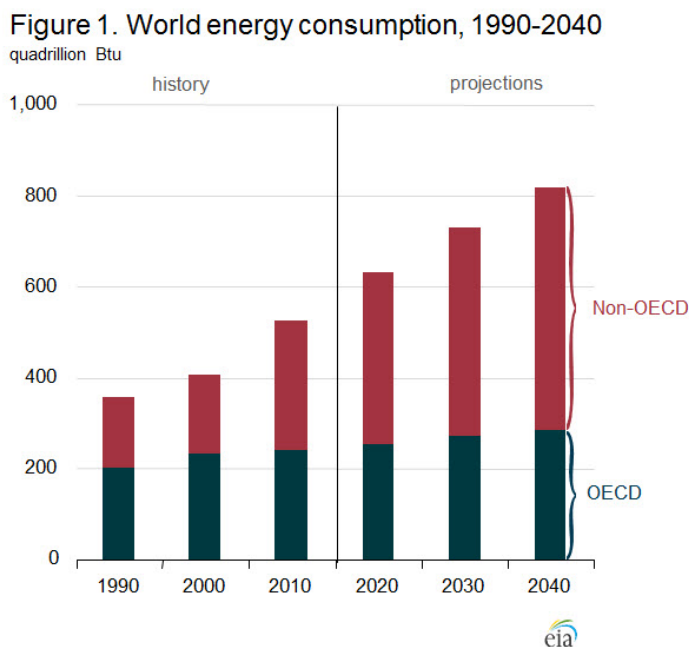


FIGURA 1.1: Demanda global de energia, histórico e previsões.

No Brasil, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) de 2014 prevê uma taxa média de crescimento de 4,7% ao ano (no período de 2013-2017) para o consumo de energia elétrica, alavancada também por eventos como a Copa do Mundo de 2014, as Olimpíadas de 2016 e pelo desenvolvimento do pré-sal.

Grande parte da matriz energética brasileira é proveniente de fontes renováveis, mais especificamente da energia hidrelétrica. Entretanto, com o ativismo ambiental em alta e uma maior consciência ecológica da sociedade como um todo, diversos projetos de usinas foram embargados, dificultando o crescimento nacional. É evidente que a solução não é desconsiderar danos ao meio ambiente, mas sim procurar novas tecnologias que permitam melhor utilizar estes recursos. Duas alternativas se configuram :

- melhorias na geração de energia, buscando aproveitamento sustentável destas energias ou mesmo fontes renováveis alternativas de energia; e
- melhorias na utilização, transporte e conversão de energia, que englobam tanto os consumidores como os sistemas de transmissão e distribuição do sistema interligado.

## 1.2 Alternativas

De modo geral, o Sistema Interligado Nacional conta quase que exclusivamente com unidades geradoras de grande porte, sendo dimensionado para permitir transferências de grandes blocos de energia entre as regiões. Dependemos amplamente de dois tipos de energia: hidráulica e térmica. Restrições ambientais inviabilizam a construção de grandes usinas hidrelétricas, subutilizando o potencial nacional. As usinas térmicas, por sua vez, possuem um custo elevado de operação (combustíveis) e são poluentes.

Nos últimos anos, investimentos crescentes foram observados em projetos de geração de energias alternativas às citadas, como os parques fotovoltaicos e eólicos, as pequenas centrais hidrelétricas (PCH), a utilização de biodigestores entre outros.

Este contexto, quando realizado próximo dos centros de consumo, é conhecido como geração distribuída, que consiste em utilizar fontes energéticas de menor porte, próximas dos consumidores finais, para abastecer um número pequeno de instalações localmente. Na composição de ambientes de geração distribuída pode-se destacar diversos elementos: painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, geradores a diesel ou microturbinas (como alternativas quando ocorre queda da rede elétrica ou necessidade de desconexão) e até mesmo bancos de baterias ou outras tecnologias de armazenamento de energia que podem otimizar a utilização da geração intermitente dos painéis e geradores eólicos e melhorar os níveis de qualidade de energia nas redes elétricas em que estejam conectadas.

Neste paradigma, pode-se apontar como pontos positivos:

- custo mais baixo do investimento inicial comparado com usinas de grande porte;
- maior confiabilidade, pois quedas em grandes unidades geradoras do sistema interligado podem deixar milhares de consumidores sem energia;
- melhor perfil energético para o consumidor final; e
- menores perdas com distribuição e transmissão, pois a geração e o consumidor ficam próximos.

Entretanto, os custos de algumas tecnologias envolvidas ainda são altos (mas vêm caindo progressivamente) e a intermitência de algumas fontes de geração insere uma dificuldade a mais na operação do sistema como um todo.

## 1.3 Estrutura para Geração Distribuída

Ao transformar os consumidores em produtores estamos estimulando uma maior conscientização e por consequência um consumo mais inteligente de energia. Com certeza, uma mudança de paradigma desta magnitude não é simplesmente inserida em qualquer sistema. Entretanto, com a possibilidade de venda de energia excedente para a rede, é necessária uma estrutura que permita o monitoramento do fluxo de potência dentro e nas fronteiras de uma unidade geradora de pequeno porte, permitindo ao consumidor ser agente nesta nova estrutura que se configura.

### 1.3.1 Smart Grid

*Smart grid* caracteriza uma rede elétrica moderna que utiliza sistemas de informação e comunicação para coletar e atuar em cima da informação (às vezes de maneira automática) de modo a melhorar a eficiência, a confiabilidade e os custos de operação da rede. Muito mais do que um simples produto, trata-se de um modo diferente de encarar o sistema elétrico, abrangendo diversos aspectos e diferentes áreas do conhecimento, a saber:

- sistemas de armazenamento e geração de energia;
- integração de geração distribuída;
- automação residencial;
- automação da distribuição;
- veículos elétricos;
- sistemas de comunicação;
- autocorreção de faltas;
- medição avançada;
- interação e participação do consumidor; e
- competitividade no mercado de energia elétrica.

Para concepção de um *smart grid*, diversas tecnologias precisam ser estudadas e aplicadas. Entre elas pode-se citar:

- comunicação integrada;
- medidores capazes de comunicação;
- operação com frequência variável;
- avançadas técnicas de controle; e
- sistemas de suporte à decisão.

### 1.3.2 Microrredes Inteligentes

Microrredes englobam grande parte das características de um *smart grid*. Elas podem ser concebidas como um conjunto de cargas e geração distribuída que é percebida pelo ambiente exterior como apenas uma unidade que é capaz de manter níveis de geração ou consumo ou operar de forma independente da rede global, em modo ilhado. Estas microrredes podem ser formadas em diversos locais como indústrias, hospitais, universidades, condomínios, parques e outros.

Estas redes de modo geral contam com elementos geradores, como painéis fotovoltaicos e geradores eólicos de pequeno porte, elementos de armazenamento, como bancos de baterias (chumbo ácido ou íon de lítio comumente) e elementos de *backup*, como geradores a diesel ou microturbinas a gás.

Uma microrrede conta com dispositivos inteligentes de comunicação e, portanto, capacidade de se comportar como uma rede de distribuição ativa, colhendo informações de diferentes cargas e geradores e impondo um balanço energético. Ela pode ser capaz de exportar potência ativa e reativa para a distribuidora caso necessário, contribuindo com um perfil energético melhor em horários de pico ou até durante faltas. O procedimento é semelhante para se realizar funções de *self-healing* ou programas de resposta à demanda <sup>1</sup>.

É possível que as microrredes se tornem os blocos construtivos do setor elétrico no futuro. A malha elétrica deve contar com diversos agentes atuando e interagindo buscando

---

<sup>1</sup>Programas onde o consumidor pode optar por reduzir o seu consumo em horários de pico, em troca de reduções em sua conta de energia elétrica e outros incentivos.

fornecer os serviços necessários, definindo-se desta forma um sistema genuinamente distribuído.

## 1.4 O Futuro

Já contando com projetos pilotos implantados no mundo inteiro, as perspectivas para o setor de microrredes são motivadoras. Esperando um aumento rápido no número de microrredes instaladas a partir de 2015, estima-se que as receitas do mercado devem passar a marca dos 40 bilhões de dólares anuais em 2020 .

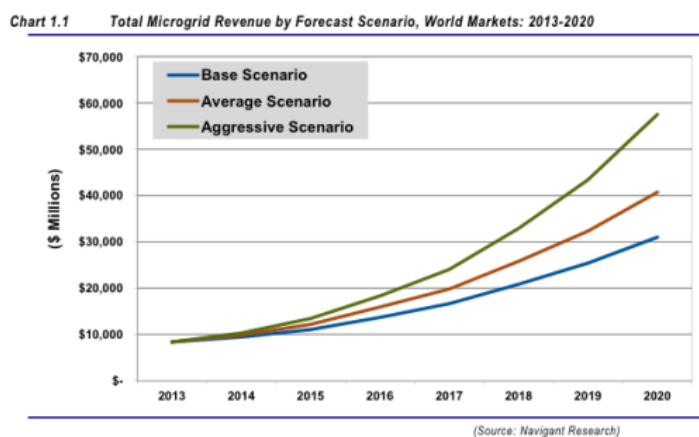


FIGURA 1.2: Previsões para a receita do mercado de microrredes.

No Brasil, começam a se configurar as primeiras *smart grids*, como a que foi inaugurada em Curitiba como projeto de teste de conceito. O projeto da Copel chamado “Paraná Smart Grid” instalou medidores inteligentes em três bairros da capital, bem como geração eólica e fotovoltaica. Aqui em Florianópolis, alguns projetos piloto estão em andamento com a participação da Fundação Certi.

## 1.5 Motivação e Objetivo

Sendo um assunto relativamente novo no Brasil, ainda existem diversas barreiras a serem transpostas. Um conhecimento mais profundo da interação entre os diversos componentes de uma microrrede é necessário, tanto para melhor entender a operação interna, bem como o seu funcionamento nos pontos de conexão com a rede de distribuição.



Como forma de melhor estudar a implantação de microrredes, a COELCE iniciou um projeto de P&D focado em microrredes em ambientes residenciais no Ceará, mais especificamente em um condomínio em Aquiraz. Busca-se através deste compreender como uma microrrede pode beneficiar os usuários e otimizar o uso de energia. Este PFC se insere neste contexto e irá analisar aspectos de gerenciamento de cargas em uma microrrede com o objetivo de otimizar sua operação no que se refere ao melhor uso dos recursos energéticos distribuídos quando a microrrede operar em modo ilhado, assim aumentando sua confiabilidade.

## 1.6 Organização do trabalho

O documento está disposto em nove capítulos que discorrem a respeito do projeto. No capítulo 2 está uma descrição do projeto, apresentando os componentes do sistema e os níveis de controle.

O capítulo 3 define o problema dentro do projeto que foi estudado, definindo os conceitos básicos ligados ao estudo. O capítulo 4, por sua vez, delinea as atividades exercidas no decorrer do estágio.

Os capítulos 5, 6 e 7 tratam das soluções encontradas, estudo, projeto, implementação e análise.

O capítulo 8 se limita à exibição dos resultados propriamente ditos e o capítulo de número 9 conclui o documento, apresentando uma análise do trabalho e perspectivas futuras.

## Capítulo 2

# Descrição do Projeto

### 2.1 Introdução

O projeto em questão, com a COELCE, é fruto da necessidade de conceber uma solução para a exploração do potencial eólico e solar do nordeste brasileiro e, ao mesmo tempo, beneficiar seus clientes.

A implantação da microrrede no condomínio em Aquiraz é uma forma de explorar este potencial e prover aos seus clientes benefícios diversos, como equipamentos de automação residencial, gerenciamento energético residencial, possibilidade de participação em programas de resposta à demanda e maior confiabilidade na energia elétrica disponível.

Para tal, estão envolvidos no projeto:

- **Centro de Energia Sustentável - CES**

O CES participa do projeto como gerente técnico, sendo responsável pelas atividades de estudo e implantação da microrrede em si. Especificamente, participa de forma ativa no que diz respeito aos protocolos de comunicação, aos produtos adquiridos e às técnicas de controle e supervisão.

- Pratil

A Pratil é uma empresa atuante no mercado de energia juntamente do grupo Enel, gigante do setor energético europeu. Estão responsáveis no projeto pelo modelo de negócios na microrrede.

## 2.2 Especificação do Projeto

A microrrede em questão é formada de dez casas participantes do programa e o condomínio em si. Nas áreas de uso comum do condomínio, serão instalados painéis fotovoltaicos e geradores eólicos, bem como um banco de baterias de íon-lítio. Todas as residências participantes contarão também com painéis fotovoltaicos, mas apenas metade delas apresentarão armazenamento local na forma de baterias de chumbo ácido. No ponto de conexão com a rede externa, utilizar-se-á um conversor *back-to-back* [3].

Além dos componentes citados, todo um sistema de controle e supervisão da microrrede estará presente. Ele é dividido entre os controladores locais, presentes em cada residência, e o controle central, responsável pelo despacho de fontes dentro da microrrede e controle da interface com a rede elétrica principal.

Segue uma descrição mais detalhada dos componentes da microrrede.

### 2.2.1 Componentes

- Painéis fotovoltaicos

Estes vão operar com controle de máxima potência, convertendo energia e injetando na microrrede o máximo possível de acordo com a radiação solar, e serão equipados com seus próprios conversores. Os painéis instalados nas residências serão de menor porte que os painéis das áreas comuns do condomínio.

- Geradores eólicos

Aerogeradores de pequeno porte serão instalados nas áreas comuns. Estes equipamentos também serão equipados com seus próprios conversores, fornecendo energia para a microrrede quando disponível.

Em conjunto com os painéis fotovoltaicos, o parque energético terá potencial de geração de 50kW.

- Bancos de baterias

A serem instaladas nas áreas comuns, as baterias de lítio-íon são as mais amplamente utilizadas em aplicações de microrredes e veículos elétricos. Isto se dá pela sua confiabilidade e pelo seu rápido tempo de resposta, da ordem de 20 milissegundos.

Estas baterias são de extrema importância em dois aspectos. Primeiramente, porque são usadas para homogeneizar a oferta de energia uma vez que atuam como elemento armazenador. Em segundo lugar, pois introduzem amortecimento no sistema, injetando e absorvendo potência em eventos transitórios rápidos. As baterias certamente serão decisivas no caso de uma queda repentina da rede pelos dois aspectos citados: elas estabilizariam a rede no transitório e manteriam energia disponível aos usuários por um certo período de tempo.

Nas residências, entretanto, serão instalados bancos de baterias de chumbo ácido, pois possuem custos mais baixos.

Claramente, estas baterias têm também pontos negativos: a densidade da sua carga é mais baixa (como consequência seu volume e peso são maiores), e permitem um número limitado de descargas profundas. Elas são, portanto, adequadas à aplicação, uma vez que os bancos locais nas residências serão muito menores e usados somente em situações críticas. Eles devem ser capazes de prover energia para as cargas prioritárias da residência por um determinado período de tempo.

- Interface com a rede elétrica principal

O equipamento de interface com a rede será um conversor *back-to-back*. São conversores capazes de conectar redes elétricas amplamente distintas, tanto com frequências diferentes como com características de corrente diferentes (CC vs. CA). O equipamento atua controlando o fluxo de energia e otimizando o controle de tensão, fornecendo ou absorvendo potência reativa. Além disso, o equipamento também permite a separação e

reconexão das redes, evitando esforços de sincronismo e manobra de disjuntores, apresentando, assim, grande flexibilidade de operação para microrrede. Apresenta, entretanto, alto custo de instalação, sendo esta sua maior desvantagem.

- Geradores de emergência

A rede pode ainda contar com geradores a diesel ou microturbinas a gás, no caso de operação ilhada. Estes geradores de *backup* podem ser dimensionados para suprir completamente a rede ou apenas as cargas prioritárias.

### 2.2.2 Controle

É implementado um sistema de controle hierárquico feito em três camadas: SCADA , controle central e controle local.

- SCADA

Deve ser capaz de acessar e exibir as principais informações da microrrede, evidenciando o necessário para o operador. Preza-se pela clareza e facilidade de uso do *software*, bem como pela velocidade de acesso às informações.

- Controlador central

Desempenha um conjunto de funções. É responsável por despachar as fontes geradoras de acordo com a necessidade da rede, utilizando de maneira inteligente as fontes renováveis e o armazenamento em bateria. Também deve coordenar a interface com a rede de distribuição principal, sinalizando ao conversor *back-to-back* as referências de potência para venda ou compra de energia. Ainda no escopo, deve ser capaz de se comunicar com os controladores locais das residências, receber e processar todos os dados e com isto atuar como gerenciador da microrrede.

- Controlador local

É o controlador local que é responsável pela administração de cargas dentro das residências. Este dispositivo deve ser capaz de administrar a potência disponível ao consumidor e chavear cargas fundamentado em prioridades. Através deste dispositivo, o usuário deve ser capaz de criar perfis de consumo para sua residência, definindo de maneira simples suas prioridades. Sendo assim, em situações de contingência, este controle local deve atuar no conjunto de cargas e baterias de modo a otimizar a experiência do usuário, garantindo mais conforto.

## 2.3 Conclusão

Foram introduzidos os elementos básicos que constituem a microrrede em questão. É palpável a importância dos aspectos de controle, comunicação e interoperação dos equipamentos. Um estudo detalhado das soluções cabíveis se mostra necessário.

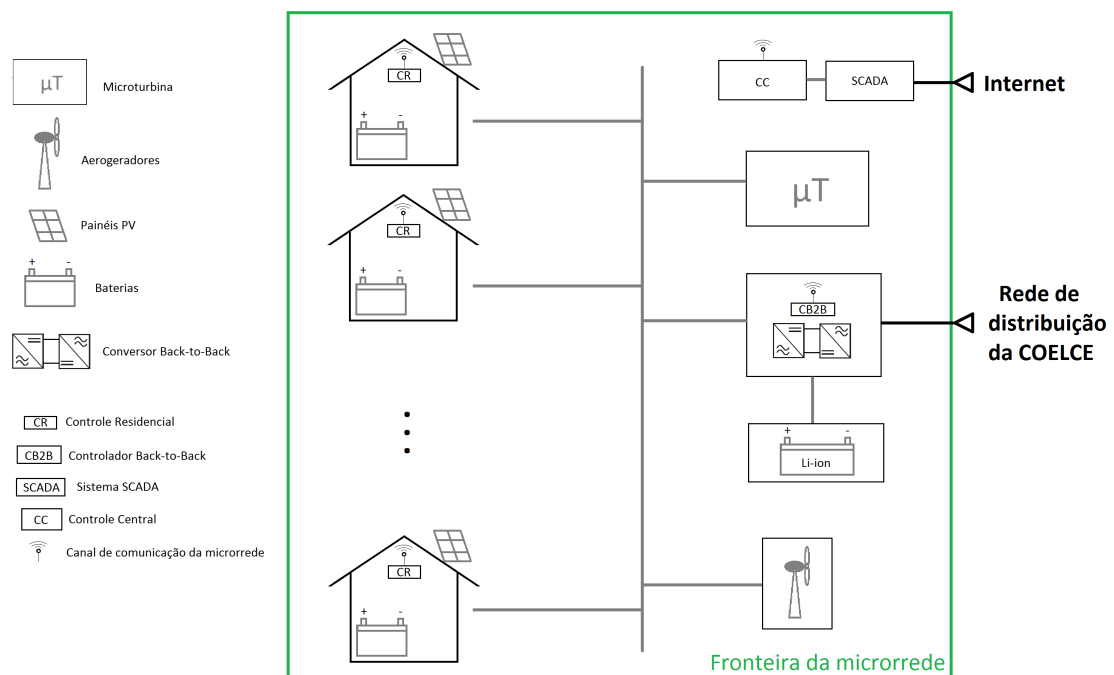


FIGURA 2.1: Esquema da microrrede descrita.

As atividades relacionadas ao controle de cargas na microrrede serão abordadas mais profundamente nos próximos capítulos.

## Capítulo 3

# Definindo o Problema

### 3.1 Introdução

Foi explicado que dentro da microrrede, diversas funções devem ser desempenhadas para garantir uma operação suave. Dentre estas, a função de descarte de cargas na microrrede é crucial para operação em modo ilhado ou em situação de contingência uma vez que as fontes locais podem não ser o suficiente para fornecer energia para todas as cargas da microrrede. Um sistema de descarte eficiente e rápido é, em grande parte, responsável pela estabilização da microrrede, sendo capaz de detectar falhas e agir de maneira apropriada, garantindo segurança e confiabilidade ao consumidor.

### 3.2 O Descarte de Cargas

Situações de desbalanço energético podem ser altamente danosas em qualquer sistema elétrico de potência. Um *deficit* de energia no sistema se traduz em níveis baixos de tensão e frequência em relação à nominal. Estas subtensão e subfrequência podem danificar equipamentos ligados ao sistema de distribuição. Para evitar o desbalanço, os geradores presentes na rede devem ser ajustados de acordo com a necessidade das cargas.

Em uma microrrede, a situação é semelhante. Os controles de despacho de carga fazem um bom trabalho mantendo os níveis de frequência e tensão estáveis durante perturbações. Eles são, entretanto, alicerçados no fato de que a microrrede tenha energia

suficiente para estabilizar o sistema. Quando a energia não é suficiente, uma estratégia de descarte de cargas deve ser aplicada.

O descarte de cargas pode ser encarado de duas formas distintas. Em um cenário onde não exista bateria, o descarte deve ser feito da maneira mais rápida possível, garantindo a estabilidade da microrrede. Entretanto, na presença de bateria, o descarte de cargas deve ser feito de modo a utilizar a bateria seguindo uma determinada estratégia.

Enquanto sua primeira forma é um problema relativamente simples, o segundo cenário pode ser ramificado em diversas estratégias. Neste capítulo, uma análise mais profunda destas estratégias será apresentada.

### **3.3 Estratégias de Descarte**

O processo de descarte efetivo das cargas pode ser feito através do uso de relés de subfrequência ou através de tomadas chaveadas. A primeira alternativa não permite tomada de decisão enquanto que a segunda o permite. Desta forma, deve-se evidenciar que as estratégias de descarte de cargas estão relacionadas principalmente à administração dos bancos de baterias da microrrede, que devem ser dimensionados de acordo com a estratégia que se almeja.

Diversas estratégias para coordenar o descarte de cargas e garantir a operação podem ser implementadas. Dentre muitas opções, selecionou-se algumas das mais interessantes para este trabalho:

- tempo máximo de operação;
- tempo mínimo garantido de operação; e
- administração ótima baseada em previsões.

Nas seções seguintes estas estratégias serão explicadas.



### 3.3.1 Tempo máximo de operação

Nesta estratégia, a microrrede conta com o banco de baterias para manter ativa suas cargas mais importantes (cargas prioritárias). Isto significa que a maior parte das cargas será cortada de modo a atender o conjunto de cargas de maior prioridade.

Estas cargas prioritárias podem ser bastante diversas, dependendo do elemento onde a microrrede esteja inserida. Em um ambiente industrial, pode ser do interesse do usuário jamais desligar um forno, pela alta perda energética que isto acarretaria. Em ambientes residenciais, entretanto, este conjunto de cargas é muito mais flexível, pois não existem elementos verdadeiramente críticos. São consideradas cargas críticas também aquelas relacionadas ao funcionamento da microrrede, podendo envolver servidores, equipamentos das redes de comunicação, PLCs e outros.

Durante a operação, os bancos de baterias podem também se recarregar devido à existência de geração distribuída. Caso as baterias estejam com carga máxima e ainda haja energia disponível na rede, o controlador pode liberar cargas não críticas, mas estas podem ser descartadas rapidamente de acordo com os valores de geração renovável, de modo a não comprometer o atendimento às cargas críticas.

Esta estratégia é bastante conservadora e encara o banco de baterias como um equipamento de emergência muito mais do que como um equipamento de potência. É bastante apropriada em casos onde o banco de baterias é pequeno em relação ao consumo médio, e largamente aplicável em ambiente industrial. Esta metodologia pode vir a ser aplicada em ambientes residenciais com pequenas reservas energéticas, mas é bastante limitante do ponto de vista do conforto, pois é inflexível.

Vale ressaltar que esta estratégia é também bastante simples do ponto de vista da implementação e operação, não sendo necessários cálculos extensos para sua utilização. Esta estratégia é encarada como referência nas seções seguintes, servindo como base de comparação.

### 3.3.2 Tempo mínimo garantido de operação

Quando operando neste modo, o controlador se preocupa em utilizar a carga da bateria de modo a atender um tempo mínimo de operação da microrrede. Ele pode liberar

energia para diversas cargas distintas baseando-se em níveis de prioridade entre elas. Portanto, além da definição destes níveis, o operador também precisa especificar um tempo mínimo de operação.

O controlador deve ser capaz de traçar um plano de consumo das baterias e monitorar seu estado de carga (SoC), do inglês *State-of-Charge*, de modo a garantir que o consumo não seja alto demais, vindo a comprometer o tempo de operação da microrrede.

Portanto, esta estratégia consiste de duas partes: em primeira instância, deve-se traçar um plano de consumo para as baterias, que as leve da carga no instante da contingência ( $Q_c$ ) até a carga mínima da bateria ( $Q_{min}$ ) no tempo mínimo de operação especificado.

Vale ressaltar que este plano é traçado de maneira bastante conservadora, não levando em consideração a geração renovável (pois esta não é confiável), e sempre observando a potência máxima dos grupos de cargas (*worst case scenario*). Desta forma, garante-se a operação pelo tempo mínimo. Até aqui, este plano é bastante parecido com o primeiro exposto.

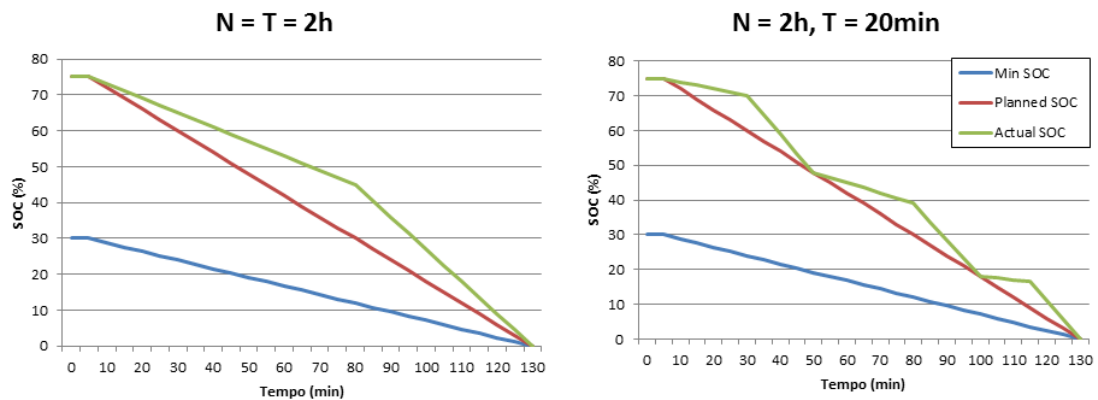


FIGURA 3.1: Estes dois casos representam a diferença entre o tempo mínimo de operação de cada carga religada. O sistema só deve liberar a reconexão de cargas quando há energia suficiente para operar a carga durante todo seu tempo mínimo de operação.  $N$  representa o número de horas a ser garantido pelo sistema de descarte e  $T$  o tempo mínimo de operação de uma carga após religamento.

A segunda parte consiste em monitorar a energia disponível da bateria e liberar ou descartar cargas de acordo com a necessidade. O monitoramento é crucial para garantir o seguimento do plano, mas também para disponibilizar a maior quantidade de energia possível durante o tempo de operação previsto.

Esta estratégia tem muita aplicabilidade em microrredes conectadas à rede principal. Apesar de se conviver com quedas repentinas, estas são falhas que se resolvem normalmente de maneira rápida. Com o dimensionamento certo do banco de baterias, o consumidor pode garantir a operação do maior número de cargas elétricas até que a rede volte.

Entretanto, esta estratégia tem seus pontos negativos. Depois de expirado o tempo mínimo de operação, as cargas críticas podem ficar sem energia, situação que pode ser indesejável em alguns casos. Outro problema deste *approach* é que ele pode vir a chavear muitas vezes o mesmo grupo de cargas de baixa prioridade durante a operação em contingência. Este ponto pode ser resolvido ao limitar o tempo mínimo de operação de grupos religados, evitando que um grupo seja religado por apenas cinco minutos, por exemplo.

### **3.3.3 Administração ótima baseada em previsões**

Finalmente, imaginou-se um modo de administração das baterias capaz de utilizar um número grande de informações a respeito da microrrede e inferir sobre o chaveamento de cargas. Neste modo, utilizam-se previsões de consumo e de geração renovável para traçar um plano de consumo das baterias.

O trabalho do controlador será o de periodicamente analisar os dados atuais da microrrede, os dados de previsão da microrrede e, através de modelos das dinâmicas das baterias, criar um plano de descarte de cargas ótimo para o seu horizonte de predição. O controlador deve então aplicar o plano e o recalcular periodicamente, garantindo a operação da microrrede como prevista.

Com esta estratégia, busca-se garantir o conforto máximo para o usuário. Tendo informações como o perfil de consumo do cliente e níveis de geração esperados, as decisões tomadas podem ser muito mais conscientes.

Note que, em sistemas de grande porte, a variabilidade de carga é menor por causa do elevado número de usuários. Numa microrrede, cada carga ou gerador correspondem a um percentual maior do trânsito total de energia. Desta forma, incertezas nos dados de previsão podem ser problemáticas, levando o sistema a uma operação indesejada,

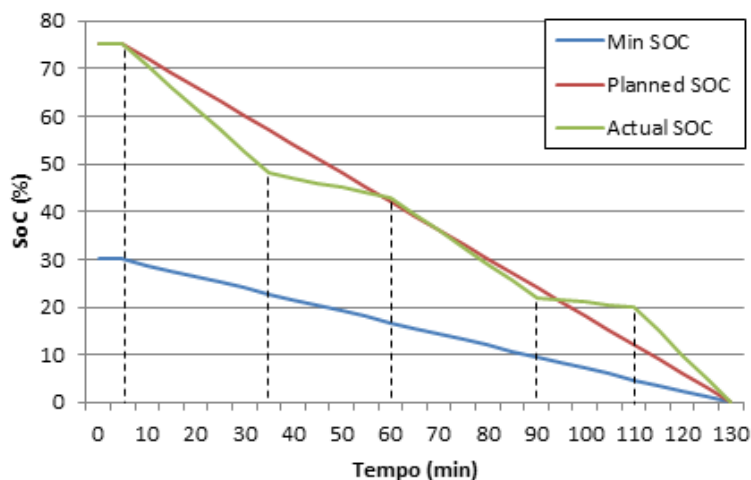


FIGURA 3.2: Este modo apresenta uma maior flexibilidade na utilização da bateria.

decorrente da utilização de dados que não correspondam à realidade. É daí que surge a necessidade da escolha adequada para a frequência com a qual o plano é recalculado.

Para aplicação desta estratégia, devem ser utilizados modelos de consumo das baterias e uma plataforma de simulação que permita testar e melhor compreender como a interação entre a microrrede e o descarte de cargas deve ocorrer.

O mecanismo de busca dos valores de chaveamento das cargas é feito através de um problema de otimização. São variáveis (*decision variables*) os níveis lógicos que comandam o chaveamento de cargas.

A formulação do problema leva em conta as previsões de demanda e de geração, bem como os limites de entrega de potência das fontes, limites de transferência de potência entre barramentos da microrrede e outros, que entram como restrições.

Neste caso a função objetivo é definida como um problema de minimização ou maximização conectado ao nível de prioridade das cargas e níveis de prioridade de uso da energia disponível.

### **3.4 Conclusão**

Foram apresentadas três diferentes estratégias de descarte de carga e administração de bateria em situações de contingência a serem exploradas neste trabalho. Estas serão projetadas e implementadas, traçando um paralelo comparativo entre os métodos, visando entender suas semelhanças e diferenças. O desenvolvimento do projeto e as ferramentas agregadas ao problema de descarte de cargas são explicadas nos capítulos seguintes.

## Capítulo 4

# Atividades no Projeto

### 4.1 Introdução

A atividade principal do projeto de fim de curso consistiu na implementação das funções de gerenciamento de cargas na microrrede. Para tal, o aluno utilizou um simulador estático que já havia sido desenvolvido previamente no CES, restando realizar ajustes e adaptações para funcionamento com cargas passíveis de descarte. Esta implementação será utilizada nos controladores locais da microrrede.

A seguir são explicadas questões de implementação do sistema de descarte de cargas como um todo.

#### 4.1.1 Simulação dinâmica de eventos da microrrede

Para melhor compreender as dinâmicas de conexão/desconexão de elementos na microrrede e as dinâmicas relacionadas às baterias e seus conversores, modelos de simulação dos elementos constituintes da microrrede foram desenvolvidos em conjunto com o Instituto de Eletrônica de Potência (INEP) em plataforma MATLAB/Simulink.

### 4.1.2 Algoritmos de controle de cargas

O projeto, implementação e testes dos algoritmos de descarte de cargas são de responsabilidade do Centro de Energias Sustentáveis e as atividades relacionadas a esta parte do projeto serão abordadas nos capítulos seguintes.

### 4.1.3 Escolha de tecnologias

Uma das exigências do projeto é que os produtos que permitem o controle de carga local – *gateway* e tomadas inteligentes - sejam produtos de prateleira já interoperáveis entre si. Portanto, é parte do escopo do projeto a escolha de tecnologias adequadas às necessidades de comunicação do controlador local com o *gateway* e às necessidades dos clientes. Uma revisão da tecnologia disponível encontra-se nos capítulos por vir.

## 4.2 Tarefas realizadas

No contexto do trabalho, o aluno avançou nas seguintes frentes:

- estudo sobre descarte de cargas em microrredes (explicada nos capítulos anteriores);
- simulações dinâmicas dos eventos mais importantes para o sistema de descarte de cargas;
- implementação do sistema de descarte de cargas; e
- estudo, análise e escolha de tecnologias para equipamentos envolvidos com o sistema de descarte de cargas.

Cada um destes será apresentado de maneira separada a seguir.

## Capítulo 5

# Modelos Utilizados nas Simulações Dinâmicas

### 5.1 Objetivo

Sistemas elétricos de pequeno porte tendem a ser mais instáveis em situações de sobrecarga. Devido ao seu tamanho, o Sistema Interligado Nacional (SIN) não sente o impacto de queda na geração da mesma forma que uma microrrede. Enquanto que o SIN conta com diversas unidades geradoras, as microrredes podem ser limitadas neste aspecto, tornando a divisão de potência complicada e muitas vezes impossível.

Com as simulações dinâmicas, objetiva-se compreender os limites de operação da microrrede em situações de falha. Para tal, propõe-se uma microrrede simples, composta por geração distribuída na forma de painéis fotovoltaicos, cargas, conexão com a rede principal e bancos de baterias.

O modelo servirá como plataforma confiável para simular situações pontuais em uma microrrede: mudanças de *set-points* nas fontes, mudanças no perfil de consumo, situações de carga e descarga das baterias e, o que é mais importante, situações de queda de fontes (renováveis ou não) e posterior descarte de cargas.



## 5.2 Funcionamento

A modelagem foi feita em MATLAB/Simulink através do pacote SimPowerSystems. Buscou-se uma simulação trifásica que não demandasse alto poder computacional e que permitisse simulações de 15 a 30 segundos. Pode-se dividir o modelo em três grandes grupos: fontes, cargas e bancos de baterias.

## 5.3 Modelos das fontes

Nestes estão incluídos os modelos referentes aos painéis fotovoltaicos com seus conversores e o modelo da rede elétrica principal e seu aparelho de interface.

### 5.3.1 Painéis fotovoltaicos

Para as simulações de interesse, que são de curta duração, julgou-se desnecessário acrescentar a dinâmica dos *loops* rápidos de controle dos elementos (dinâmicas internas). Este é o caso do modelo do painel, que é visto como fonte de corrente (Fig.5.1) conectada a um inversor de potência (Fig. 5.3), este sim visto como um modelo de valor médio como em [4]. Através do controle da fonte de corrente, injeta-se potência no sistema.

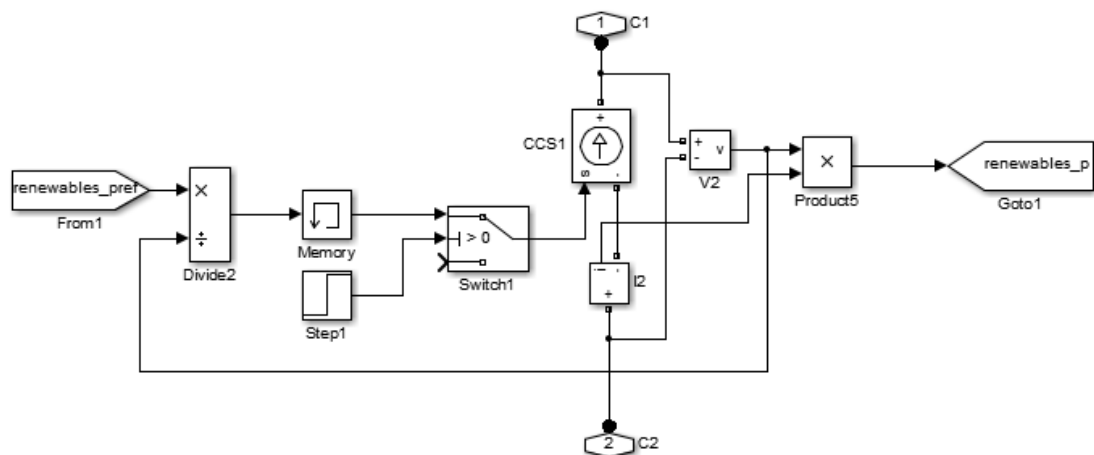


FIGURA 5.1: Implementação dos painéis fotovoltaicos.

O modelo do inversor é utilizado tanto para os painéis quanto para as baterias. Seu funcionamento é apresentado nas equações 5.1 - 5.3.

$$\delta = \begin{cases} \delta_a = \sin(\omega t) \\ \delta_a = \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \delta_a = \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (5.1)$$

então:

$$v_{abc} = M(\delta \cdot V_{dc}) \quad (5.2)$$

$$I_{dc} = M(\delta \cdot i_{abc}) \quad (5.3)$$

As figuras 5.2 e 5.3 exibem o modelo teórico do inversor e sua implementação no Simulink respectivamente. Além da implementação do modelo teórico, observa-se a implementação das impedâncias virtuais como visto em [5, 6] e o uso dos blocos de memória para sanar os problemas de loops algébricos, ambos tópicos discutidos em 5.6.

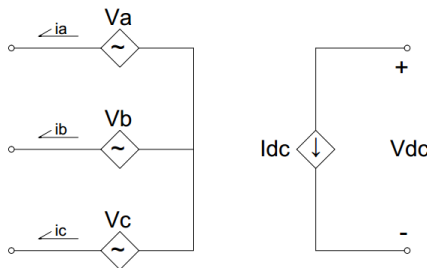


FIGURA 5.2: Modelo dos Inversores.

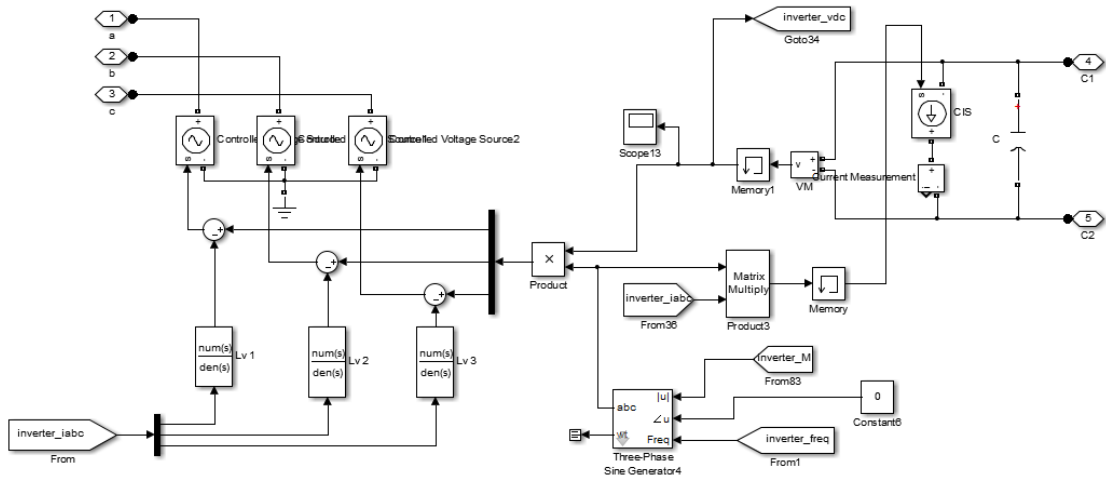


FIGURA 5.3: Implementação dos Inversores.

### 5.3.2 Rede principal e interfaceamento

Quando em modo conectado, qualquer deficit de geração deve ser provido à microrrede pela rede principal. Enquanto que em uma microrrede observam-se quedas de frequência durante a operação normal, o sistema elétrico interligado mantém a frequência constante em 60 Hz.

A modelagem é feita com uma fonte isócrona e infinita, sendo capaz de lidar com qualquer deficit ou excedente de energia. É de se esperar que a conexão com a rede principal acabe por regular a frequência da microrrede.

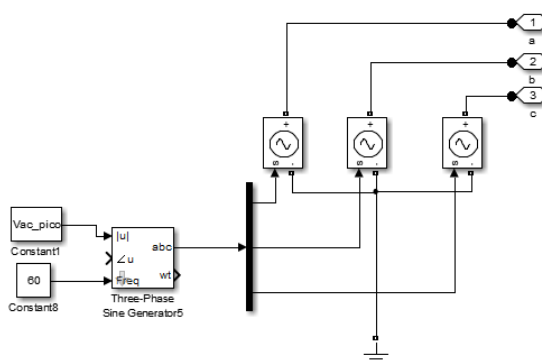


FIGURA 5.4: Implementação da rede principal

Além disso, um equipamento de fronteira com a rede principal é modelado, sendo capaz de ilhar ou resincronizar a microrrede através da análise das formas de onda dos dois lados. Este equipamento conta com malhas de controle para comandar as fontes da microrrede e, em vista disso, terá requisitos de comportamento dinâmico. Espera-se que o controle seja capaz de sincronizar as duas redes em tempo inferior a cinco segundos e não apresentar sobressinal de potência ativa e reativa maior que 10% da potência das fontes.

## 5.4 Modelos das cargas

As cargas são divididas em dois tipos, as de potência constante e as de potência variável. Esta distinção se deu como uma estratégia de diminuir o tempo de simulação e, ao mesmo tempo, ser capaz de testar cargas distribuídas em toda estrutura da microrrede, não apenas em um ponto.

### 5.4.1 Cargas de potência constante

Utilizam-se os modelos trifásicos de carga do próprio pacote SimPowerSystems. Além de serem de baixo custo computacional, estes podem ser espalhados em diversos pontos da microrrede, de modo a testar a influência de cargas muito próximas das fontes ou muito distantes.

Estas cargas podem ser definidas como um par de potências ativa e reativa, podendo a última ser indutiva ou capacitiva. Estes blocos são estáticos durante a simulação, sem a possibilidade de mudança de *set-point* em tempo de simulação.

### 5.4.2 Cargas de potência variável

Foram analisados diferentes métodos para modelagem de cargas CA, buscando um modelo computacionalmente viável. Em um primeiro instante, pensou-se apenas em chavear diversos blocos de cargas de potência constante. Esta estratégia simples é de fácil implementação, mas o chaveamento das cargas introduz dinâmicas de alto custo do ponto de vista computacional, e de pouco impacto nas dinâmicas mais lentas que efetivamente nos interessam.

Em segundo lugar, elaborou-se um modelo de carga que utilize uma ponte retificadora em associação com filtros e controle de tensão, de modo a permitir uma carga constante, definida pelos valores dos resistores ( $P = V^2/R$ ), assemelhando-se assim aos blocos já oferecidos pelo pacote do Simulink. A ideia é então associar uma fonte de corrente controlada no lugar dos resistores, podendo alterar seu *set-point* ( $P = Vi$ ).

Em terceiro lugar, foram concebidos modelos de cargas fundados na transformada dq0 [7], onde uma transformada da tensão de entrada e um *set-point* de potência montam um sistema de duas equações e duas variáveis, cujas soluções são *set-points* de corrente no sistema de eixos dq0. Através da transformada inversa, pode-se projetar um sistema de potência variável, ideal para nossa aplicação.

Por fim, foram concebidas cargas que operam em cima da variação de frequência da microrrede, operando em frequências mais baixas e induzindo as fontes da microrrede a fornecer mais potência. Estes modelos simplificados são bastante interessantes, pois são

basicamente os modelos das fontes conectados de maneira inversa e com os *set-points* de frequência determinados por um *loop* externo de controle da potência ativa.

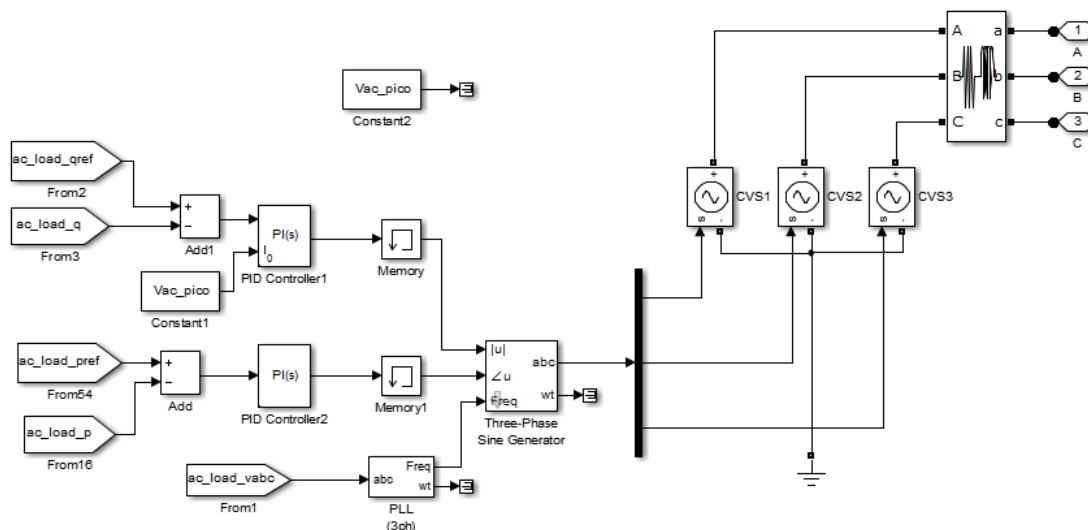


FIGURA 5.5: Implementação das Cargas de Potência Variável

Os últimos se mostraram os menos custosos à simulação, com um modelo claro e de execução rápida. Foram, portanto, os modelos empregados na simulação, permitindo o controle em tempo de simulação da potência consumida, bem como simulações na faixa de tempo desejada.

## 5.5 Bancos de baterias

Os modelos dos bancos de baterias se dividem em dois: as células e o conversor.

### 5.5.1 Células

As células são modelos já prontos do SimPowerSystems, restando especificar os parâmetros das baterias: sua capacidade, tensão nominal, tipo, eficiência e curvas de carga e descarga. O dimensionamento da bateria é importante para que a simulação corresponda à realidade. Um banco de baterias com muita capacidade pode amortecer mais o sistema, mas não ser necessário, sendo um cenário de simulação que pouco ajuda, pois não é uma representação fiel do projeto.

### 5.5.2 Conversor

O conversor é novamente modelado por valores médios, sem chaveamento de semicondutores. Desta forma, é fácil omitir as dinâmicas mais rápidas associadas ao chaveamento e tornar a simulação mais veloz.

Uma fonte controlada de corrente é conectada à bateria e um gerador trifásico é conectado às linhas da microrrede. Os valores de referência para o gerador são dependentes dos *set-points* de potência e dos valores de corrente retirados da bateria.

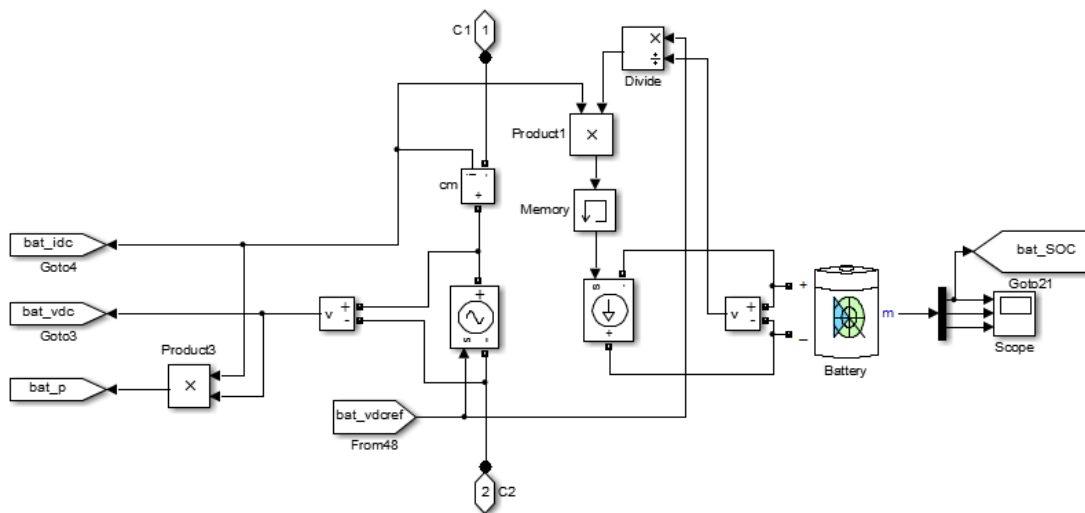


FIGURA 5.6: Implementação do Conversor da bateria. Nota-se a célula à direita da imagem.

## 5.6 Outros aspectos

Finalmente, alguns outros aspectos da simulação precisam ser explicados. Em especial, pode-se destacar o método de divisão de potência na microrrede, que é crucial para compreensão das dinâmicas envolvidas em todos os eventos que podem vir a ocorrer na microrrede.

Para explicar o método empregado, deve-se também explicar a necessidade e implementação das impedâncias virtuais nos modelos dos inversores, bem como a modelagem das linhas de condução.

Por fim, uma das problemáticas da implementação dos modelos de valores médios é a inserção de *loops* algébricos na simulação, que acabam por torná-la mais lenta e, por vezes, até a impossibilitam.

### 5.6.1 Divisão de Potência

É função do controlador central da microrrede fornecer os *set-points* de potência para as fontes, função esta que é desempenhada periodicamente em intervalos de um a cinco minutos. Sendo assim, é possível que, entre um *set-point* e outro, a demanda ou a geração distribuída apresente variações, desequilibrando o balanço de potência no sistema.

As simulações projetadas duram entre 15 e 30 segundos, janela de tempo menor que a periodicidade dos *set-points*. Assim, é necessária a inserção de um modo de divisão de frequência a nível mais baixo.

### 5.6.2 Divisão de potência pela frequência de geração

Para tal, foram utilizados **controladores de droop** como demonstrado em [8]. Estes funcionam emulando o comportamento de um gerador síncrono, que tende a diminuir sua velocidade de rotação em resposta a um aumento de carga.

Desta forma, um desbalanço energético gera variações de frequência e estabiliza a rede em uma frequência diferente, mas ainda assim atende à potência requerida. As características de *droop* são geralmente lineares e representadas pela seguinte equação:

$$f = f_0 - k(P_{out} - P_{ref}) \quad (5.4)$$

Onde  $f$  é a frequência de geração,  $f_0$  é a frequência nominal (60 ou 50  $Hz$ ) e  $k$  é o ganho determinante da inclinação da curva de droop.

Sendo assim, pode-se perceber que quando  $P_{out}$  aumenta (devido a uma demanda maior), a frequência de geração diminui e só volta a  $f_0$  quando  $P_{ref}$  é corrigido pelo controlador central ou quando os níveis de demanda e geração voltam aos seus valores iniciais.

Nesta configuração a frequência se torna de fato um sinal capaz de indicar uma mudança nos níveis de demanda ou geração.

O emprego deste método apresenta destarte diversas vantagens. Em primeiro lugar, implementa um controle descentralizado que não necessita de comunicação entre as fontes, podendo caracterizar verdadeiramente um sistema *plug-and-play* de geradores [9]. Em segundo lugar, através do ajuste do ganho  $k$ , permite uma divisão de potência arbitrária, podendo um gerador assumir mais potência que os outros, sendo dependente apenas de sua curva de *droop*. Deste modo, o controlador central da microrrede funciona ajustando estas curvas para reestabelecer a frequência nominal ( $f_0$ ).

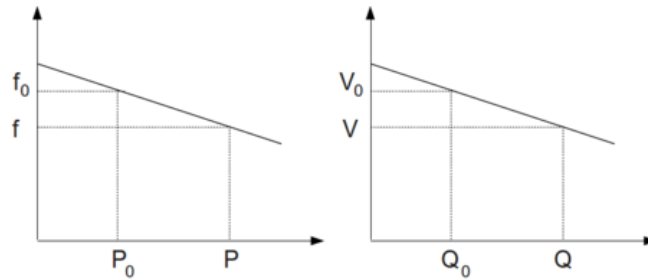


FIGURA 5.7: Curvas de *droop* típicas de potência ativa e reativa.

Em contrapartida, excursões muito grandes de frequência podem instabilizar o sistema como um todo, resultando na queda da microrrede. Para evitar isto, é preciso limitar as variações de frequência de acordo com a necessidade.

### 5.6.3 Impedância virtual

Para que a divisão de potência ocorra como esperado nas características da figura 5.7, é necessário que as linhas de transmissão sejam predominantemente indutivas. Como forma de garantir este aspecto, faz-se o uso de impedâncias virtuais de saída dos conversores. Estas são modeladas como um sistema de segunda ordem cujos zeros dependem dos valores desejados de indutância e resistência virtuais ( $L_v$  e  $R_v$  respectivamente):

$$Zv(s) = \frac{L_v s + R_v}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (5.5)$$

A entrada do sistema são os valores de corrente de saída do inversor e a saída é subtraída dos valores de referência de tensão do inversor.  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são filtros utilizados para corrigir os problemas de *loops* algébricos (explicados a seguir) e para tornar o sistema realizável, evitando transferência instantânea entre entrada e saída em um bloco de modelo.



$L_v$  deve ser escolhido de modo a tornar as linhas predominantemente indutivas e  $R_v$  pode ser um valor negativo, utilizado para compensar as resistências inerentes às linhas e permitir ao inversor “perceber” linhas de transmissão quase que puramente indutivas, garantindo o comportamento desejado dos controladores de *droop*.

Vale ressaltar, entretanto, que as resistências das linhas adicionam amortecimento ao sistema, podendo ser vantajoso escolher um valor não nulo ( $R_v + R_l > 0$ ).

#### 5.6.4 Linhas de transmissão

As linhas de transmissão foram modeladas seguindo valores de referência de resistência e indutância por metro de cabo, considerando-as linhas curtas. Desta maneira, estas grandezas podem ser multiplicadas para representar cabos maiores ou menores, de acordo com a topologia da rede.

#### 5.6.5 *Loops* algébricos

*Loops* algébricos são cenários decorrentes da realimentação direta, quando a entrada do sistema em um dado instante equivale à saída deste sistema no mesmo instante, uma situação não coerente.

A modelagem por valores médios introduz uma grande quantidade de *loops* algébricos, pois possui dois sistemas desconexos do ponto de vista elétrico, mas dependentes de grandezas do outro lado. Quando a transferência é direta, caracteriza-se um *loop* algébrico.

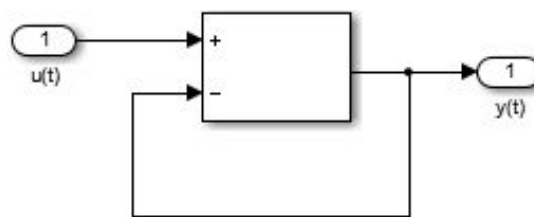


FIGURA 5.8: *Loop* algébrico.

O Simulink é capaz de resolver estes conflitos, mas à custa da velocidade de simulação. Uma solução simples é a inserção de filtros rápidos, isto é, com constantes de tempo próximas ao passo de simulação. Ou ainda a utilização de blocos de memória ou *delays* unitários nas medições, desacoplando as duas dinâmicas.

## Capítulo 6

# Sistema de Descarte de Cargas: Projeto e Implementação

### 6.1 Objetivo

Com o projeto do gerenciador de cargas objetiva-se conceber um sistema que, a partir de um simulador de microrredes, gerencie o chaveamento de cargas não críticas em situações de contingência, utilizando a energia presente nas baterias conforme uma determinada estratégia.

Para implementar e avaliar a performance do sistema de descarte de cargas, alguns pontos precisam ser atendidos:

- é necessária uma plataforma de simulação que opere com modelos fiéis dos elementos constituintes da microrrede, providenciando uma base sólida para análise do sistema sendo desenvolvido;
- o sistema de descarte de cargas deve ser flexível, possibilitando o teste de diversas estratégias para o gerenciamento de cargas; e
- o algoritmo para chaveamento de cargas não deve ser de alto custo computacional, pois este será executado no controlador geral da microrrede.

## 6.2 Projeto do Gerenciador

O sistema de descarte de cargas foi concebido em três modos de operação: tempo máximo de operação, tempo mínimo garantido de operação e administração ótima baseada em previsões. Logo, como a primeira estratégia é bastante simples e independente de qualquer variável de estado do sistema, o projeto será focado nas duas últimas estratégias.

### 6.2.1 Tempo mínimo garantido de operação

A implementação desta estratégia conta com alguns passos, descritos a seguir.

- Monitoramento dos fatores de contingência

Deve ser feito a cada instante de simulação e consiste em checar todas as fontes de energia que podem falhar, buscando informações e mantendo um histórico de cada uma delas, sendo assim capaz de sinalizar a ocorrência de um problema.

- Criação de um plano de contingência

Caso uma contingência ocorra, o sistema deve criar e aplicar um plano de contingência, liberando o maior número de cargas possíveis (respeitando suas respectivas prioridades) para a situação da bateria no momento da falha.

- Controle do seguimento do plano de contingência

Caso o plano original não seja ideal, o sistema deve também ser capaz de reavaliar a situação e liberar ou descartar cargas adicionais para que o SoC das baterias se mantenha dentro dos limites planejados. Como mencionado anteriormente, este método pode vir a chavear grupos de cargas com frequência. Para evitar este problema, insere-se uma restrição de tempo mínimo de operação de cada carga religada, somente permitindo a reconexão uma vez que haja carga o suficiente nas baterias para operação da carga pelo tempo mínimo requerido.

Assim, este plano não precisaria de um modelo da bateria, ele opera como se o sistema de armazenamento de energia fosse uma caixa preta, apenas se preocupando em atuar nos blocos de carga para seguir um plano de referência.

### 6.2.2 Administração ótima baseada em previsões

Como mencionado no Capítulo 3, esta estratégia será modelada como um problema de otimização. Este será do tipo *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), uma categoria de problemas que consiste em funções objetivo lineares e sujeito a restrições também lineares, podendo ter variáveis de valores contínuos ou discretos.

#### Função objetivo

A função custo a ser implementada é relacionada com a prioridade entre as cargas, podendo depender de outros parâmetros também. O problema pode ser visto de duas formas: ou de maximização ou de minimização.

$$\max \sum_{t=0}^{HP} \sum_{load=l_1}^{l_n} \text{prioridade}(load) * \text{operando}(load) \quad (6.1)$$

Onde  $HP$  é o horizonte de predição em um sistema com um grupo de cargas  $L = (l_1, l_2, \dots, l_n)$ .

Para o problema de minimização, é necessário determinar prioridades menores para cargas mais prioritárias e, para o de maximização, o contrário. Pode-se também incluir um termo dependente de  $t$  no horizonte de predição para que o sistema tente religar as cargas o mais rápido possível.

#### Modelos das baterias

Para estimar a energia disponível na bateria durante o horizonte de predição, um modelo de passos incrementais dos bancos de baterias deve ser elaborado. Diversos modelos estão disponíveis na literatura, cada um com suas devidas aplicações.

Busca-se modelar da melhor forma possível duas características básicas: variações de capacidade de acordo com a descarga, e efeitos de recuperação da bateria.

Os modelos mais complexos de células de baterias são os modelos eletroquímicos, capazes de modelar os efeitos fundamentando-se nas reações químicas que ocorrem. São,

portanto, os modelos mais precisos, porém os mais custosos do ponto de vista da implementação, alguns consistindo de até seis equações diferenciais acopladas.

Em seguida, existem os modelos elétricos behaviorais das baterias, consistindo geralmente de alguns elementos básicos: um capacitor representante da capacidade da bateria, um normalizador de taxa de descarga (que determina a capacidade perdida em correntes altas de descarga), um circuito de descarga, uma tabela relacionando SoC com tensão de saída e um resistor representando a resistência interna da bateria.

Os modelos que mais se adequam à aplicação são os modelos analíticos, sendo o mais proeminente entre eles o KiBaM (Kinetic Battery Model), um modelo relativamente simples mas que representa os dois efeitos citados acima.

- Kinetic Battery Model

O KiBaM é um modelo analítico desenvolvido no Laboratório de Pesquisas em Energias Renováveis da Universidade de Massachusetts [10]. O KiBaM é um modelo bastante intuitivo. Ele é chamado de *Kinetic* por utilizar um processo de cinética química como base. Neste modelo, a carga das baterias é dividida entre dois tanques.

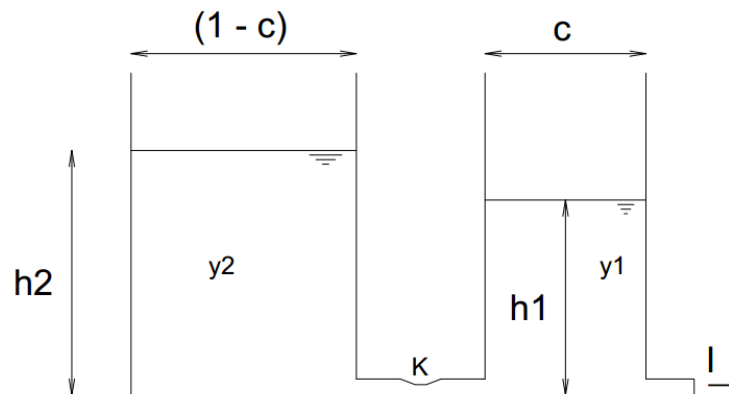


FIGURA 6.1: Modelo representativo do KiBaM.

Um primeiro tanque representa a energia prontamente disponível para ser entregue como potência às cargas. Um segundo, chamado de tanque de energia limitada, transmite energia somente para o primeiro.

A taxa com a qual a energia flui do segundo tanque ao primeiro depende em primeira instância da diferença de altura entre os tanques e uma taxa  $K$ . Outro parâmetro

(c) representa a fração da carga total na bateria que faz parte do tanque de energia disponível. Finalmente, a taxa de mudança de carga nos dois tanques é dada por um sistema de equações diferenciais:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -I + k(h_2 - h_1) \\ \frac{dy_2}{dt} = -k(h_2 - h_1) \end{cases} \quad (6.2)$$

Sendo  $C$  a capacidade total da bateria, as condições iniciais são dadas por  $y_1(0) = c.C$  e  $y_2(0) = (1 - c).C$ . Quando uma carga  $I$  é aplicada, a carga no primeiro tanque reduz-se e a diferença entre a altura dos dois tanques aumenta. Ao remover a carga, a energia flui do tanque de energia limitada para o tanque de energia disponível até que  $h_2 = h_1$ .

Além das cargas nas baterias, o KiBaM também modela a tensão durante a descarga. O modelo é o de um circuito com uma fonte de tensão em série com uma resistência interna  $R_{in}$ , de forma que a tensão de saída  $V$  é dada por:

$$V = E - IR_{in} \quad (6.3)$$

Finalmente,  $E$  é determinado por:

$$E = E_0 + AX + \frac{CX}{D - X} \quad (6.4)$$

Onde  $E_0$  representa a tensão da bateria quando totalmente carregada,  $A$  é um parâmetro que reflete a variação inicial linear da tensão em função do SoC,  $C$  e  $D$  são parâmetros que refletem o declínio da tensão quando a bateria é descarregada progressivamente, e  $X$  representa a carga retirada da bateria. Todos os parâmetros podem ser obtidos a partir das curvas de descarga da bateria [11].

O KiBaM foi desenvolvido buscando modelar bancos de baterias de chumbo-ácido, que têm um perfil de descarga relativamente linear. Isto significa que a modelagem da tensão de descarga não é boa para modelos de bancos de baterias mais modernos de lítio-íon. Entretanto, quando preocupado apenas com o tempo de descarga da bateria, este modelo de dois tanques ainda é bastante útil, pois descreve tanto o efeito de recuperação como o de variação da capacidade com a descarga.

- Modelo simplificado

Como uma maneira de simplificar o problema a ser resolvido, apresenta-se um modelo simplificado da bateria, que não modela suas dinâmicas relacionadas às reações químicas nas células, sendo apenas um modelo energético, onde  $E$  é a energia disponível na bateria e  $P_{bat}$  sua potência instantânea.

$$E(k + 1) = E(k) - P_{bat}(k) * dt \quad (6.5)$$

Desta forma pode-se facilmente implementar este modelo no problema de otimização, garantindo um baixo custo computacional. Além disso, apesar de não modelar algumas dinâmicas importantes, estas podem ter impacto mínimo num horizonte de predição de duas horas, por exemplo.

Para garantir uma operação suave, os parâmetros da bateria podem ser estimados de maneira conservadora, sempre subestimando a carga disponível na bateria para que, em operação normal, sempre se tenha mais energia disponível do que o estimado. Para maior flexibilidade na parametrização, pode-se estender o modelo da bateria da seguinte forma:

$$E(k + 1) = E(k) - \left( \frac{Pd_{bat}(k)}{Nd} - \frac{Pc_{bat}(k)}{Nc} \right) \quad (6.6)$$

inserindo, assim, valores de eficiência diferentes para descarga e recarga.

### 6.3 Implementação do Gerenciador

Para efetivamente implementar o gerenciador da microrrede é necessário primeiro estudar e escolher as ferramentas e tecnologias disponíveis e plausíveis de serem utilizadas no projeto. O primeiro passo consiste em escolher o simulador da microrrede. Em seguida serão apresentadas as ferramentas utilizadas na implementação das estratégias do sistema de descarte de cargas.

### 6.3.1 Simulador da microrrede

Para simular o comportamento da microrrede, utilizou-se um projeto já previamente desenvolvido no CES, um simulador estático de microrredes. Este projeto resultou em um programa em Java com modelos fiéis de diversos elementos constituintes de uma microrrede: painéis fotovoltaicos, aerogeradores, microturbinas e outras fontes geradoras.

Alguns ajustes no simulador foram necessários para permitir o chaveamento de cargas e a simulação de situações de contingência. A seguir apresentam-se elementos básicos do simulador.

#### Componentes

Os componentes da microrrede são modelados pelos objetos *Components*, que se ramificam em diversas subclasses, como demonstrado na figura 6.4.

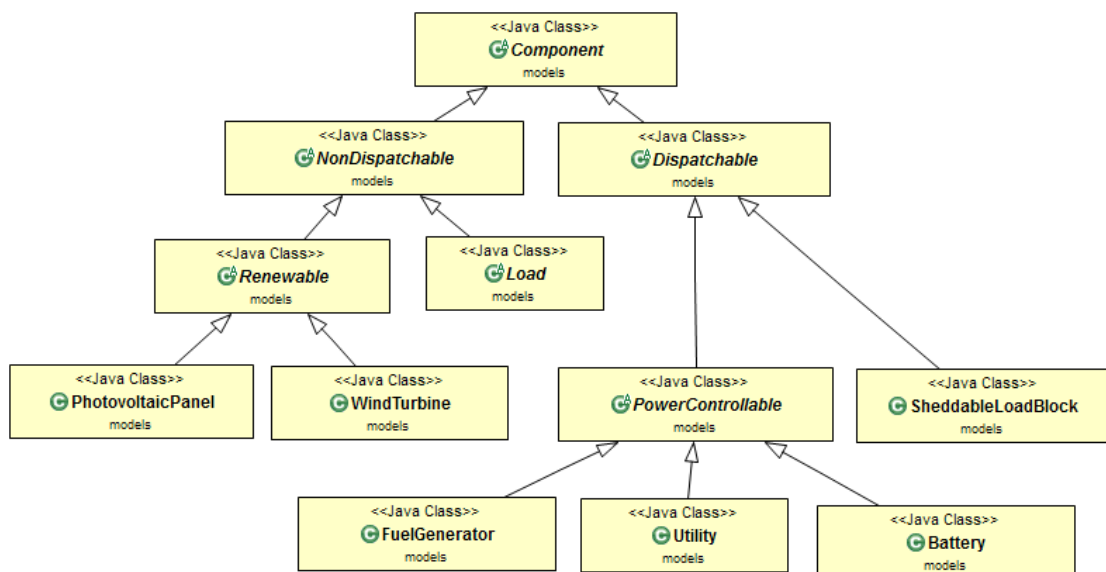


FIGURA 6.2: Objetos *Components*.

Cada um dos objetos contém uma descrição do comportamento do elemento na microrrede. Todos eles herdam da superclasse *Components* o método *nextTimeStep()*, que, a partir de informações da classe, é capaz de determinar seu comportamento no instante seguinte de simulação. No caso de uma bateria, esta função seria responsável por atualizar os valores de potência, carga e desgaste dos bancos de acordo com a potência sendo entregue ou absorvida e seus parâmetros internos.



Para utilizar o simulador em conjunto com o sistema de gerenciamento de cargas, inseriu-se novas subclasses representantes das cargas descartáveis, os objetos *SheddableLoadBlock*. Estes elementos são modelados de maneira semelhante a uma carga normal, possuindo internamente um vetor com valores de potência para cada instante de simulação. Entretanto, pelas suas características, o bloco é uma subclasse de *Dispatchable*, pois pode ser controlado.

Outra alteração necessária para os testes com o gerenciador de cargas foi a inserção de situações de contingência nos modelos. Os objetos *Utility* (representantes da rede de distribuição principal) foram atualizados para conter informações a respeito de sua disponibilidade, atualizando seus valores máximos e mínimos de potência para zero quando indisponível.

### Setup da simulação

Para iniciar uma nova simulação, utiliza-se a classe abstrata *Simulation*. Esta classe contém os métodos necessários que inicializam a simulação, criam e organizam os *logs* (resultados efetivos da simulação) e executam cada passo de simulação.

Quando se especifica uma nova simulação, o usuário deve agrupar os componentes constituintes em um objeto do tipo *Grid*, que é o responsável por invocar os métodos *nextTimeStep()* de cada elemento e balancear a rede em caso de desbalanço (função *loadBalancing()*).

### 6.3.2 Ferramentas e tecnologias

Antes do desenvolvimento efetivo, buscou-se estudar e escolher um entre os diversos caminhos que poderiam ser seguidos. Os itens a continuação descrevem os fatores mais básicos relacionados à implementação do sistema em questão.

- Linguagem de programação

Apesar da facilidade de integração do simulador em Java com outras linguagens de programação, optou-se por implementar as estratégias na mesma linguagem do simulador da microrrede em si. Mesmo com a disponibilidade de linguagens mais modernas como

```

// Wind Turbine
double[] datawind = Logger.readdouble("wind",1,0,0);
WindTurbine gen_wind = new WindTurbine("WindTurbine", TurbineType.SKYS2k4, datawind);
gen_wind.setDispatchData(datawind);
grid.addComponent(gen_wind);

// PhotovoltaicPanel
double[] datasolar = Logger.readdouble("solar",1,0,0);
PhotovoltaicPanel gen_PV = new PhotovoltaicPanel("PV",24,datasolar);
gen_PV.setDispatchData(datasolar);
grid.addComponent(gen_PV);

// SheddableLoad
double[] dataShedLoad1 = Logger.readdouble("shedload1", -0.1,0,0);
SheddableLoadBlock SLB1 = new SheddableLoadBlock("ShedLoad1",dataShedLoad1);
SLB1.setPriority(750);
grid.addComponent(SLB1);

double[] dataShedLoad2 = Logger.readdouble("shedload2", -0.15,0,0);
SheddableLoadBlock SLB2 = new SheddableLoadBlock("ShedLoad2",dataShedLoad2);
SLB2.setPriority(250);
grid.addComponent(SLB2);

double[] dataShedLoad3 = Logger.readdouble("shedload3", -0.2,0,0);
SheddableLoadBlock SLB3 = new SheddableLoadBlock("ShedLoad3",dataShedLoad3);
SLB3.setPriority(25);
grid.addComponent(SLB3);

// LOADs
double[] dataACload = Logger.readdouble("labplan/load",-0.1,0,0);
grid.addComponent(new ACLoad("ACLoad", dataACload));
double[] dataDCload = Logger.readdouble("labplan/load",-0.2,0,0);
grid.addComponent(new DCLoad("DCLoad", dataDCload));

// Utility
double[] buyprices = Logger.readdouble("labplan/buyprices",1,0,0);
double[] sellprices = Logger.readdouble("labplan/sellprices",1,0,0);
Utility utility = new Utility("Utility", buyprices, sellprices);
int[] uptime = new int[buyprices.length];
for (int i=0; i<uptime.length; i++)
    uptime[i]=(i>10 && i<500)?0:1;
    //uptime[i] = 1;
utility.setUpTime(uptime);
grid.addComponent(utility);

// Battery
grid.addComponent(new Battery("Batteries",CellType.LOADMANAGER,0,0,0,Mode.DROOP));
grid.setLoadmanager(new OptimizedManager(60, 300));

```

---

FIGURA 6.3: Código do setup da simulação.

Python, que conta com extensas bibliotecas e uma maior facilidade de programação, ainda optou-se por utilizar o Java por três motivos:

1. a integração se dá automaticamente, não sendo necessário nenhum esforço para interfacear o simulador e o gerenciador;
2. o Java apresenta maior velocidade de execução quando comparada com Python, fator crítico no projeto; e
3. o aluno é mais familiar com a linguagem.

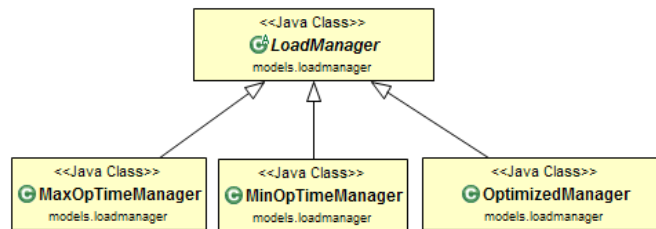
Além dos pontos citados acima, Java é uma linguagem já consolidada e que deve ser utilizada na implementação do controlador local. Desta forma a programação das estratégias pode ser reaproveitada, evitando retrabalho.

- Ambiente de desenvolvimento

Com a escolha da linguagem de programação efetuada, optou-se pela utilização do IDE Eclipse como ferramenta de desenvolvimento. Este oferece diversos recursos nativos que facilitam e agilizam o desenvolvimento, bem como diversos *plug-ins* capazes de ampliar ainda mais os recursos disponíveis dentro do programa. Ao mesmo tempo, optou-se pelo uso de um controle de versões de modo a organizar o desenvolvimento do código entre os desenvolvedores, rastrear as alterações realizadas no programa e servir de ferramenta de *backup* para ele. O sistema de controle utilizado foi o *Subversion* (SVN), ferramenta desenvolvida pela *Apache Software Foundation* e distribuída de maneira gratuita.

### 6.3.3 Estratégias de operação

Como diversas estratégias serão implementadas e comparadas entre si, buscou-se implementar o sistema de descarte de cargas seguindo um padrão chamado **Strategy Pattern**, que consiste na criação de uma classe abstrata que contém os métodos pertinentes ao descarte propriamente dito, e que serve de interface entre o simulador e os diferentes métodos de operação. Define-se então uma família de algoritmos e encapsula-se cada um destes algoritmos e seus respectivos métodos.

FIGURA 6.4: Objetos *Load Manager*.

Além de ser uma solução elegante ela ainda possui diversas vantagens: possibilidade de intercambiar os diferentes modos de operação em tempo de execução do código, manutenção facilitada do código e possibilidade de criação de novas estratégias sem interferir nas existentes.

### Administração ótima baseada em previsões

Para implementação deste modo de operação, há necessidade de:

- uma plataforma (*solver*) capaz de resolver problemas do tipo MILP; e
- uma descrição das restrições, da função objetivo, das variáveis de otimização e de outros dados no formato utilizado pelo *solver* escolhido.

Quanto ao primeiro item, alguns *solvers* de código aberto como o **lp\_solve** e o **GLPK** foram analisados e considerados bons candidatos. Em segundo plano, o *solver* proprietário **Gurobi** é um dos que demonstra melhor desempenho, sendo capaz de se beneficiar de processadores modernos *multi-core*. No entanto, por causa do alto valor de sua licença, este *solver* foi desconsiderado para o projeto, mas ainda assim testado através de uma licença acadêmica.

Sobre o segundo ponto: na linguagem Java, diferentes *solvers* possuem diferentes sintaxes para setar o ambiente de otimização. Isto significa que, para testar os diversos *solvers*, seria necessário remodelar o mesmo problema para cada *solver* individualmente. Como solução, optou-se por utilizar a ferramenta **OptimJ** da Ateji.

- OptimJ

O OptimJ nada mais é do que uma extensão do Java criada para descrever modelos de otimização e abstrações para quantidades grandes de dados a serem processados. Apareceu pela primeira vez em 2006, desenvolvido pela Ateji, uma empresa fundada em Paris que fechou em 2011.

A extensão busca disponibilizar uma maneira clara para modelagem de problemas de otimização, bem como disponibilizar as facilidades relacionadas à programação orientada a objetos para profissionais do campo de otimização, eliminando barreiras entre as ferramentas de otimização e as aplicações propriamente ditas.

Sendo diretamente compatível com Java e suas bibliotecas, a extensão funciona de forma perfeita como interface entre os *solvers* e a aplicação, permitindo testar uma ampla gama de algoritmos para uma mesma modelagem do problema. Apresenta suporte para os *solvers* de código aberto **lp\_solve** e **GLPK** bem como outros comerciais como o **Gurobi** e o **MOSEK**.

Além disso, a Ateji ainda disponibiliza um *plug-in* para o Eclipse, facilitando sua utilização. Pelo fato de o produto ter sido descontinuado, a Ateji o disponibiliza de maneira gratuita, mas não suporta o JRE 1.7, sendo necessária a utilização da versão 1.6 do ambiente.

Pelas vantagens citadas, o OptimJ foi utilizado na implementação, unificando desta forma a linguagem de programação entre o simulador e o otimizador, demonstrando resultados positivos e viabilizando o uso das mesmas estruturas existentes no simulador para modelar e rodar o problema de otimização.

## 6.4 Conclusão

Neste capítulo foram descritas as ferramentas e tecnologias utilizadas na implementação do sistema de gerenciamento, bem como fragmentos de código relacionados a elas. Nos capítulos posteriores serão apresentados os resultados das diferentes estratégias utilizadas e uma análise crítica das diferenças entre elas.

## Capítulo 7

# Estudo e Análise de Tecnologias Disponíveis

### 7.1 Introdução

O mercado de automação residencial e gestão energética da residência é crescente no contexto mundial. O fornecimento de equipamentos como estes demonstra competição acirrada, contando com participação de grandes empresas (Schneider, Verizon, Panasonic e Nest, recentemente adquirida pela Google). Soluções de diversos fabricantes se fazem disponíveis, cada uma com seus pontos positivos e negativos.

É parte do projeto a busca e análise de produtos e tecnologias disponíveis para comandar o descarte de cargas dentro da residência. De acordo com esta necessidade, foram pesquisados e estudados diversos produtos de prateleira disponíveis no mercado internacional, levantando seus dados mais básicos: protocolos de comunicação, escalabilidade, funcionalidades e faixa de preço.

### 7.2 Tecnologias disponíveis

Nas seções seguintes são detalhadas as soluções mais atrativas presentes no mercado e uma tabela comparativa serve de ferramenta para assistir a decisão final.

### 7.2.1 Pluzzy

Os produtos da linha Pluzzy da Toshiba são a solução da fabricante para o problema de gestão energética residencial. São compostos de um gateway (Pluzzy box), tomadas inteligentes, *smart meters*, e outros sensores secundários (de presença, temperatura e humidade). A comunicação é baseada em ZigBee, contribuindo para modularidade do produto. Conta também com módulos de controle de temperatura da residência e possibilidade de controle remoto através de aplicativos de celular ou acesso direto pela internet.



FIGURA 7.1: Elementos do Pluzzy: Gateway e tomadas inteligentes.

### 7.2.2 Home Energy Management Suite

Contando com controladores de cargas grandes, esta linha de produtos da Energate é direcionada para programas de gestão pela demanda. Os módulos de controle são capazes de controlar compressores, aquecedores de água e bombas.



FIGURA 7.2: Elementos do Energate: Gateway, controlador de cargas grandes e aparelho de interface com rede ethernet.

Do ponto de vista da comunicação é um equipamento bastante versátil, tendo como canal principal uma rede baseada em ZigBee e WiFi mas possibilitando comunicação

com outros equipamentos através de uma AMI (Advanced Metering Infrastructure) ou rádio FM, podendo ainda se comunicar com equipamentos através da internet (mediante instalação de equipamentos adicionais).

### 7.2.3 Smart Home

Produto bastante completo da alemã RWE opera tanto com tomadas inteligentes como com sistemas de controle de temperatura da residência. A comunicação entre gateway e equipamentos Smart Home se dá através de protocolo IP.

É um dos poucos produtos que disponibiliza tomadas integradas na parede e uma gama de sensores e atuadores como detector de fumaça, detector de movimento, atuadores e sensores para janelas e persianas e botões programáveis integrados na residência, todos interoperáveis de modo a facilitar a instalação.



FIGURA 7.3: Família de produtos RWE Smart Home.

Disponibiliza através da internet informações do sistema e permite controle remoto a partir do browser ou de aplicativo para *smartphone*. A comunicação com outros equipamentos pode ser feita através de portas USB no dispositivo *gateway*.

### 7.2.4 Wiser Home Management System

O Wiser é a solução comercializada pela Schneider Electric para gerenciamento energético residencial. Sendo bastante completo, o produto conta com tomadas inteligentes para aplicações menores e controladores de cargas grandes (aquecedores, bombas e outras).



O *gateway* se comunica com os outros equipamentos através de uma rede ZigBee e o sistema como um todo pode ser monitorado através da internet como no caso do produto Smart Home.

Além dos controladores de carga, o produto pode ser expandido com um termostato à parte que está equipado para participar em programas de resposta à demanda. A Schneider também vende um carregador de veículos elétricos que interoperava com os equipamentos do Wiser e atualmente em desenvolvimento está um inversor de painéis fotovoltaicos também integrado à plataforma.



FIGURA 7.4: Elementos do Wiser: Gateway, interface ethernet, *smart plug*, controlador de cargas e pinças amperimétricas.

Vale ressaltar que o produto também pode se comunicar com os *smart meters* através de pinças amperimétricas.

### 7.3 Comparação entre os produtos

A estrutura dos produtos não difere muito, são geralmente compostos de um gateway e equipamentos secundários. Para o projeto, o mais importante é que o produto seja capaz de chavear tanto cargas simples (*smart plugs*) como cargas de potência maior através dos controladores específicos.

Além disso, é importante que o produto se comunique com elementos externos que permitam o controle a nível superior. É também desejável uma interface ethernet que permita a exteriorização dos dados de forma simples e rápida. Por fim, integração com a rede de medição pode ser um grande facilitador para o projeto e, portanto, também visto como um ponto positivo para o equipamento.

A tabela 7.1 resume as informações obtidas dos produtos.

	Pluzzy	Home Energy Management Suite	Smart Home	Wiser Home Management
Comunicação com smart meters	Por contagem de pulsos	Integração com AMI	Sem suporte	Pinças amperimétricas
Comunicação com dispositivos	ZigBee	ZigBee e WiFi	Protocolo próprio	ZigBee
Controle de cargas	Sobre tomadas	Sobre cargas de grande porte	Tomadas e cargas de grande porte	Tomadas e cargas de grande porte
Sensores	Temperatura, humidade, presença e abertura/fechamento de portas ou janelas	Temperatura	Humidade, presença e abertura/fechamento de portas ou janelas	Temperatura
Controle e monitoramento	Internet e <i>Smartphone</i>	Internet e localmente em display	Internet e <i>Smartphone</i>	Internet e <i>Smartphone</i>
Preço relativo	Razoável	Baixo	Alto	Alto

TABELA 7.1: Informações dos produtos contemplados.

## 7.4 Conclusão

Pelos pontos levantados em 7.3, os únicos produtos analisados que se enquadram nas necessidades do projeto são os produtos da RWE e da Schneider.

Entretanto, por serem produtos pioneiros, estes ainda não estão disponíveis prontamente no mercado brasileiro. A Schneider informou que há possibilidade de aquisição dos produtos da linha Wiser, mas somente através de algum fornecedor internacional. Já a RWE não exporta para o Brasil, impossibilitando o seu uso.

É, portanto, provável que o escolhido seja a solução da Schneider, restando executar testes em bancada com o produto para decisão final.

# Capítulo 8

## Resultados

### 8.1 Introdução

Os resultados apresentados podem ser divididos em duas partes: a dinâmica e a estática. A primeira exhibe o comportamento do sistema elétrico envolvido e do controle empregado para operar uma microrrede com fontes trabalhando em conjunto e atendendo um determinado número de cargas.

A parte estática preocupa-se com o controle a nível mais alto, responsável por comandar o chaveamento de cargas nos momentos oportunos e, conseqüentemente, administrar a carga nas baterias.

### 8.2 Simulações Dinâmicas da Microrrede

#### 8.2.1 Chaveamento de Carga

O primeiro cenário simulado é evidentemente o de descarte de carga. Buscou-se estressar a bateria, exigindo uma variação grande de potência. Para tal, utilizou-se uma configuração com painéis fotovoltaicos e em modo ilhado. As dinâmicas da bateria são as que mais interessam pois estão ligadas intimamente ao sistema de descarte de cargas a ser projetado a seguir.

A tabela [8.1](#) e a figura [8.1](#) exibem os valores de demanda e geração solar.

t (seg)	0	5	10	15	20	25
L (kW)	10	12	14	0	0	0
PV (kW)	5	6	7	8	10	1

TABELA 8.1: Dados de demanda e geração

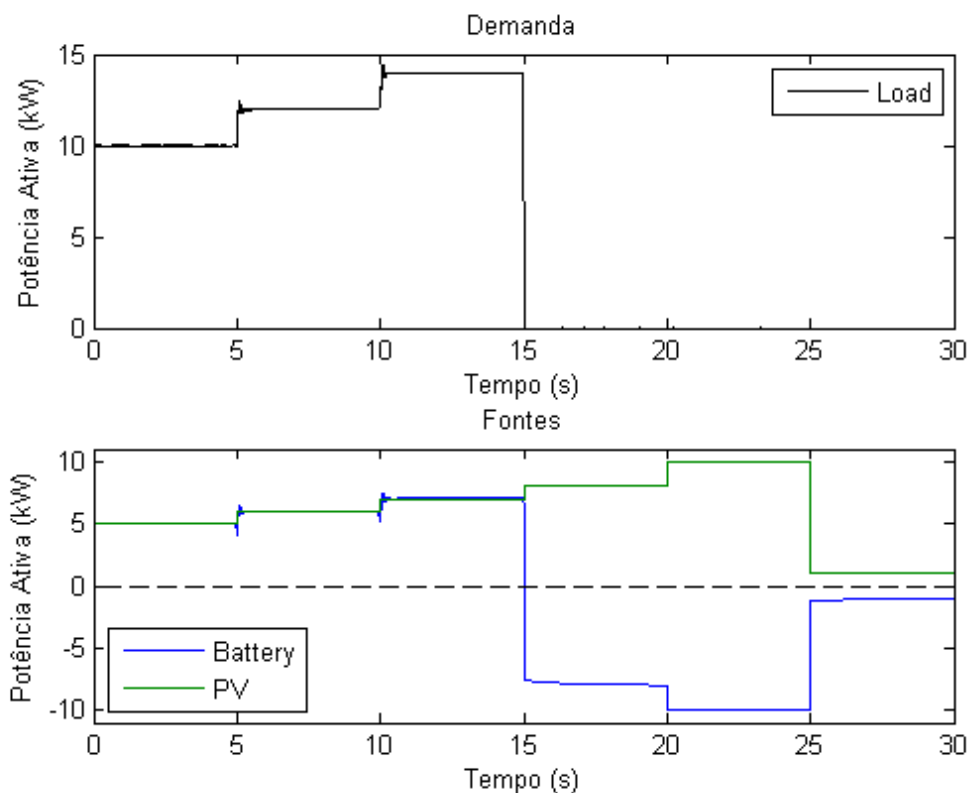


FIGURA 8.1: Potência dos elementos envolvidos na simulação do chaveamento de carga.

A figura 8.2 exibe o percentual de carga na bateria. Pode-se ver o ponto de inflexão na curva, que indica que a bateria parou de exportar energia e começou a absorver. Isto é reflexo de que os bancos de bateria se comportam como esperado nesta configuração.

### 8.2.2 Queda da rede

O segundo cenário é o de queda da rede. Para simular este cenário, assume-se geração distribuída nula. A tabela 8.2 indica os valores referentes à demanda no período:

Na figura 8.3 observa-se que no instante  $t = 15$  s a rede falha, criando um deficit de 15 kW de geração. Sem nenhuma fonte alternativa, as baterias injetam energia na microrrede,

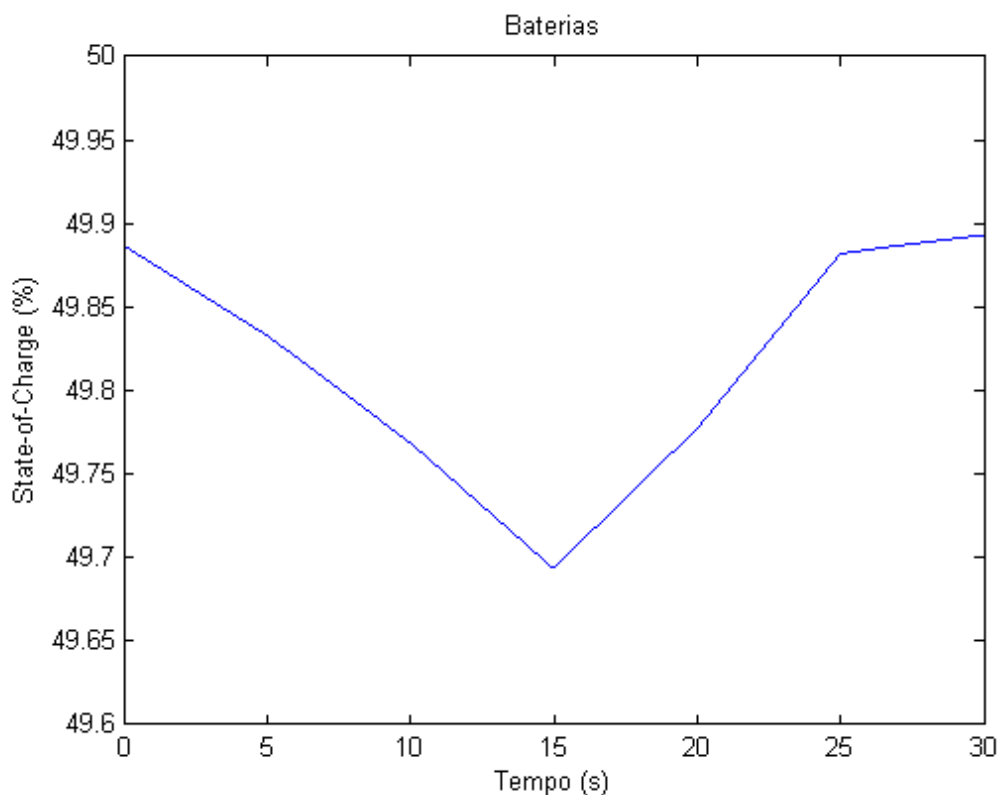


FIGURA 8.2: *State-of-Charge* da bateria durante o período transitório no chaveamento de carga.

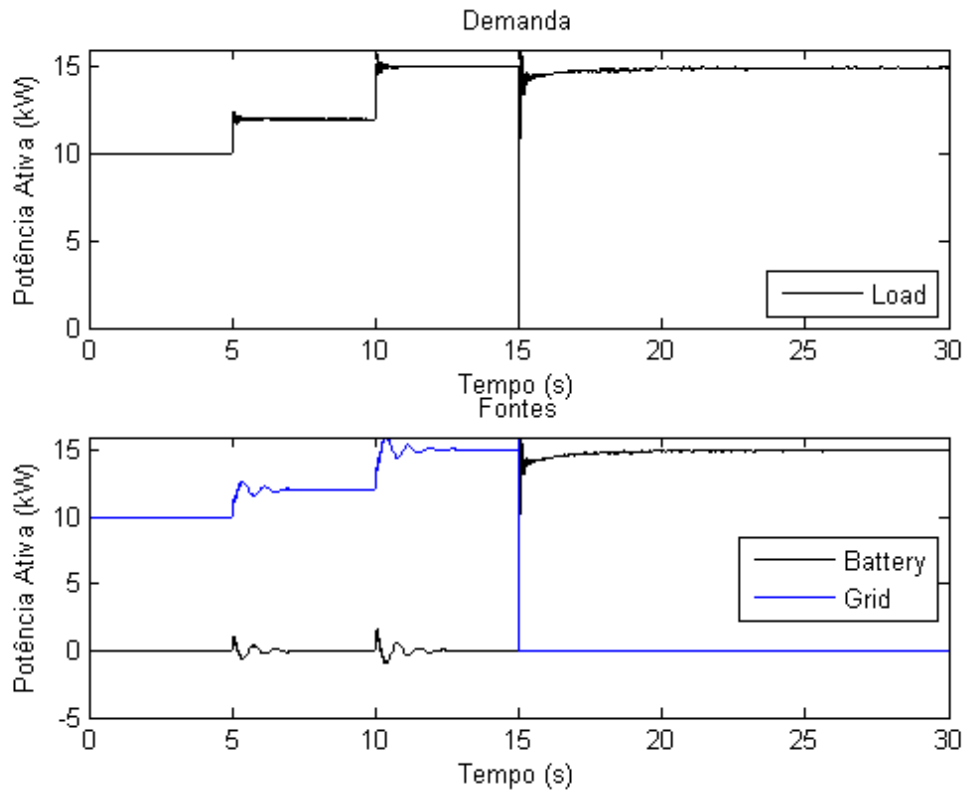
t (seg)	0	5	10	15	20	25
L (kW)	10	12	15	15	15	15
up (bool)	1	1	1	0	0	0

TABELA 8.2: Dados de demanda, geração e disponibilidade da rede.

mas observa-se que a carga sofre um pouco, desviando de seu valor de referência por alguns instantes.

A figura 8.4 ilustra como o envio de valores de *set-points* para bateria pode ajudar o desempenho dinâmico dela. No primeiro quadro, nenhum valor de referência é enviado e a bateria tem um desempenho lento. No segundo quadro, o valor exato de *set-point* é enviado (cenário idealizado). Nota-se que o transitório é muito menor.

Entretanto, por causa de erros de previsão, incertezas nos modelos e periodicidade de envio, nem sempre os *set-points* estarão corretos. O terceiro quadro demonstra que mesmo com erros grandes nos valores de referência (superior à 15%) o sistema ainda se

FIGURA 8.3: Cenário de queda da rede em  $t = 15s$ .

t (seg)	0	5	10	15	20	25
L (kW)	15	12	10	10	10	10
PV (kW)	0	3	6	9	10	1
up (bool)	1	1	1	1	0	0

TABELA 8.3: Dados de entrada para o caso misto

comporta de maneira mais satisfatória que sem nenhum valor, apresentando um tempo de 5% semelhante ao sistema da segunda imagem.

### 8.2.3 Caso misto

O último caso apresenta uma situação normal de operação, apresentando desconexão da rede e variações na geração distribuída. Os dados de entrada estão na tabela 8.3.

A figura 8.6 ilustra como evolui a divisão de potência ativa entre os elementos geradores. Se vê que, em boa parte da simulação, a geração dos PVs é responsável por suprir a

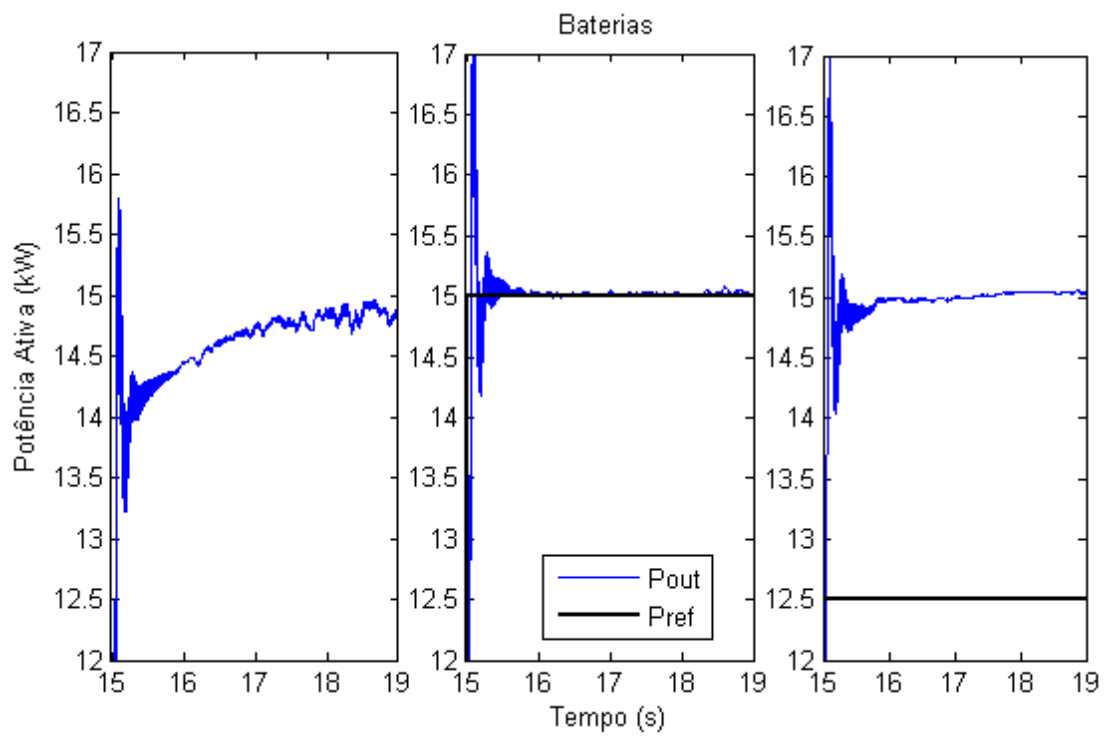


FIGURA 8.4: Diferença entre as dinâmicas de potência ativa de acordo com o *set-point*

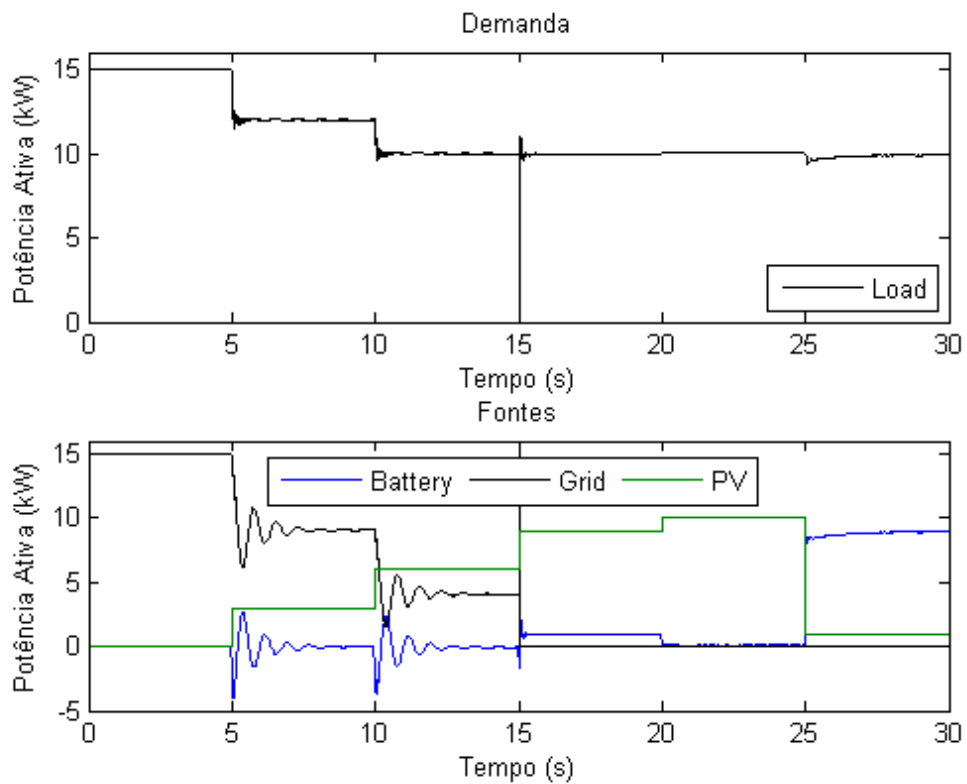


FIGURA 8.5: Potência Ativa dos elementos envolvidos na simulação do caso misto.

carga quase que na sua totalidade, a bateria atuando como um elemento amortecedor da intermitência da geração solar.

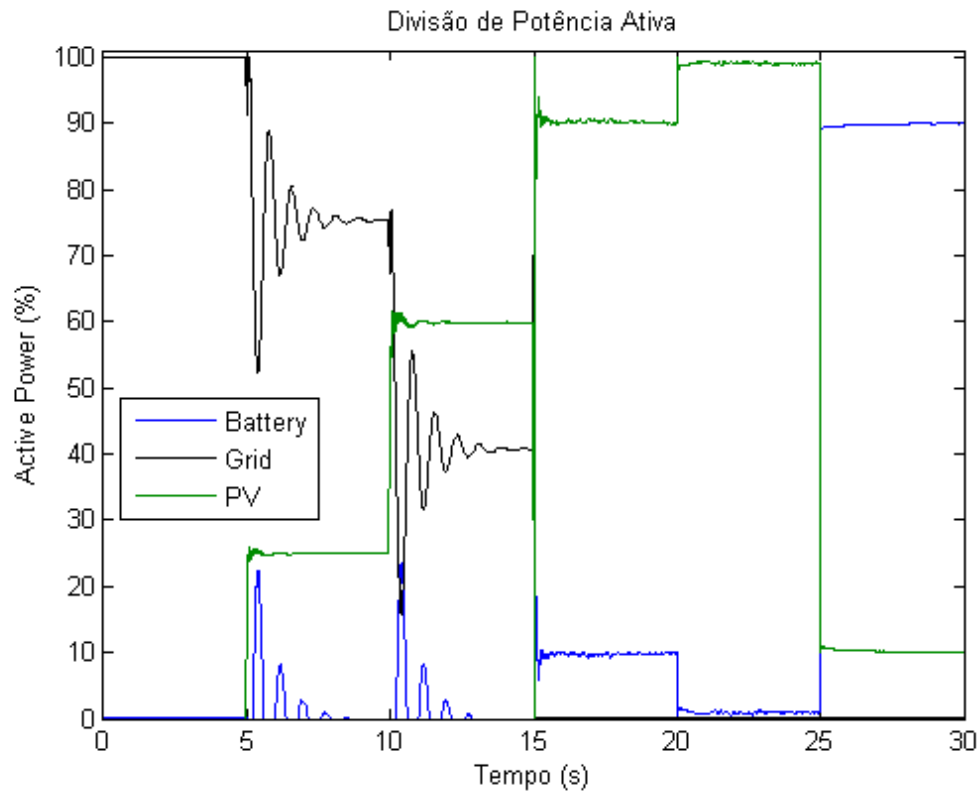


FIGURA 8.6: Distribuição de potência ativa entre as fontes na simulação do caso misto.

Foram exibidos resultados relacionados a eventos isolados da microrrede, sempre buscando demonstrar situações críticas em sua operação. As simulações aqui apresentadas permitiram grande flexibilidade no estudo e especificação dos requisitos do sistema de descarte de cargas, além de esclarecer pontos críticos da operação em modo de *droop* da microrrede.

### 8.3 Sistema de Descarte de Cargas

Os resultados do sistema de descarte de cargas foram obtidos com uma configuração de microrrede bastante simplificada, composta de três cargas de potência constante passíveis de descarte, uma carga de potência variável que não pode ser descartada, painéis fotovoltaicos e bancos de baterias.



Em todos os casos, a rede cai em  $t = 60$  e retorna em  $t = 500$ . Neste período o sistema de descarte deve agir de modo a administrar a carga das baterias. Os gráficos são arranjados da seguinte forma:

1. Estado das cargas passíveis de descarte, **ShedLoad1\_op**, **ShedLoad2\_op** e **ShedLoad3\_op** sendo a primeira a de maior prioridade (menos provável de ser descartada).
2. Potência dos bancos de baterias e da rede de distribuição.
3. SoC das baterias.
4. Demanda das cargas não passíveis de descarte

Os dados apresentados são gerados pela simulação e apresentados no programa *Simview*.

### 8.3.1 Modo de tempo máximo de operação

Como já apresentado, este modo desliga todas as cargas passíveis de descarte, garantindo potência para carga não descartável pelo maior tempo possível.

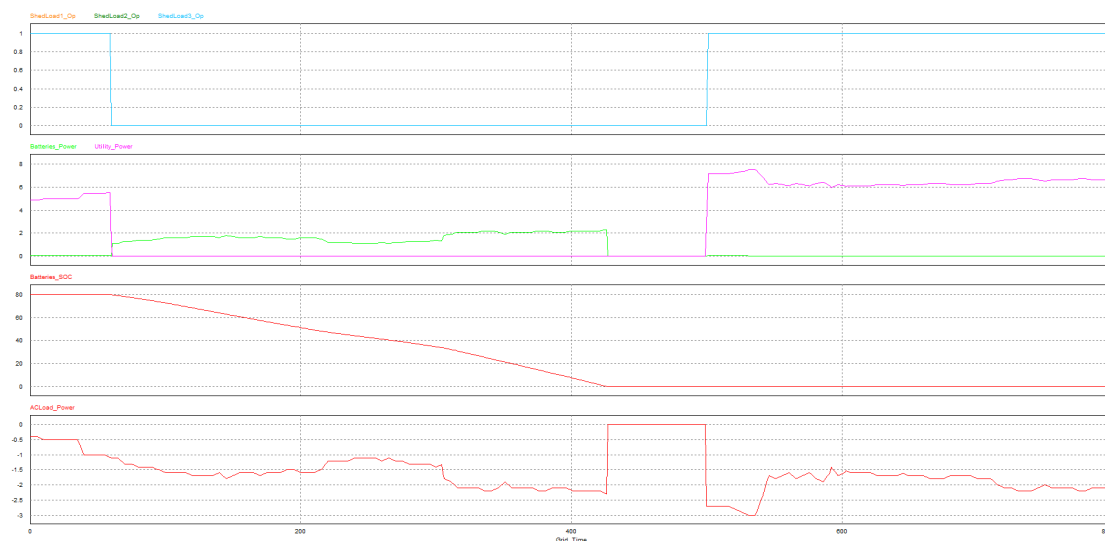


FIGURA 8.7: Modo de tempo máximo de operação em situação de contingência.

Nesta simulação não utilizou-se geração distribuída, apenas as baterias e a rede como fontes.

### 8.3.2 Modo de tempo mínimo de operação

Este modo é mais complexo que o anterior, permitindo religamento de cargas durante a operação e buscando aumentar o conforto do consumidor quando em situação de falta. Em um primeiro instante, simulou-se a microrrede sem geração distribuída novamente. Nota-se que as cargas são descartadas sequencialmente dependendo de suas prioridades (figura ).

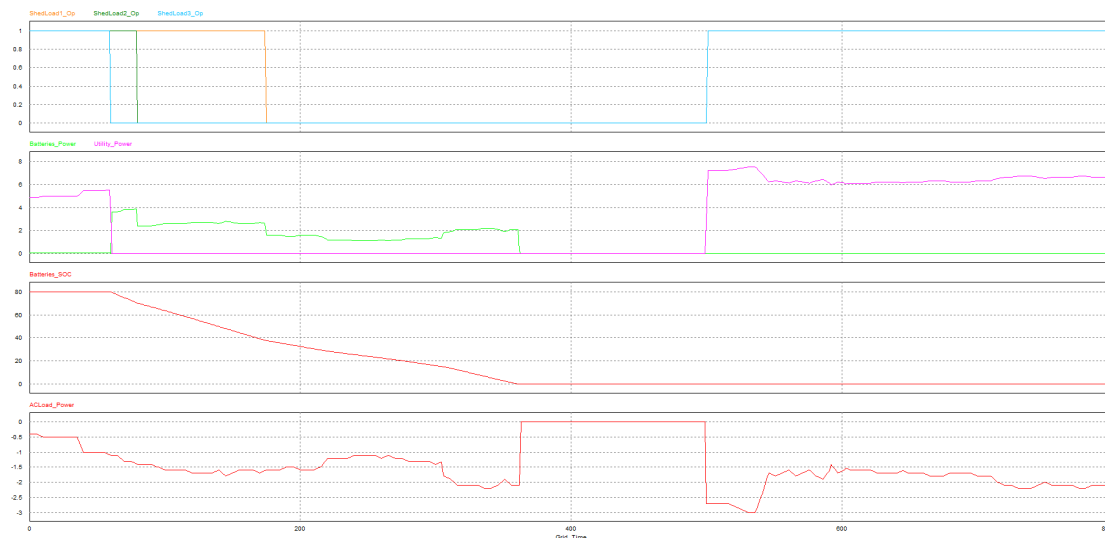


FIGURA 8.8: Modo de tempo mínimo garantido de operação, caso 1.

Neste caso, optou-se por operar a microrrede por um tempo mínimo de cinco horas (300 minutos). Nota-se que o sistema descarta cargas em momentos oportunos, totalizando ao fim 300 minutos de operação a partir do momento da falta ( $t = 60$  s).

No cenário seguinte, buscou-se exibir a influência da geração distribuída neste modo de operação.

Nesta situação observa-se um chaveamento mais intenso de cargas. Vê-se um comportamento semelhante no início do período de contingência, pois a geração fotovoltaica está em zero. Entretanto, momentos após os painéis começarem a injetar energia na microrrede, o sistema religa o segundo bloco de cargas passíveis de descarte. Isto acontece pois o SoC desvia do planejado, indicando um excedente de energia. Mais a frente este comportamento se repete, havendo reconexão do terceiro bloco.

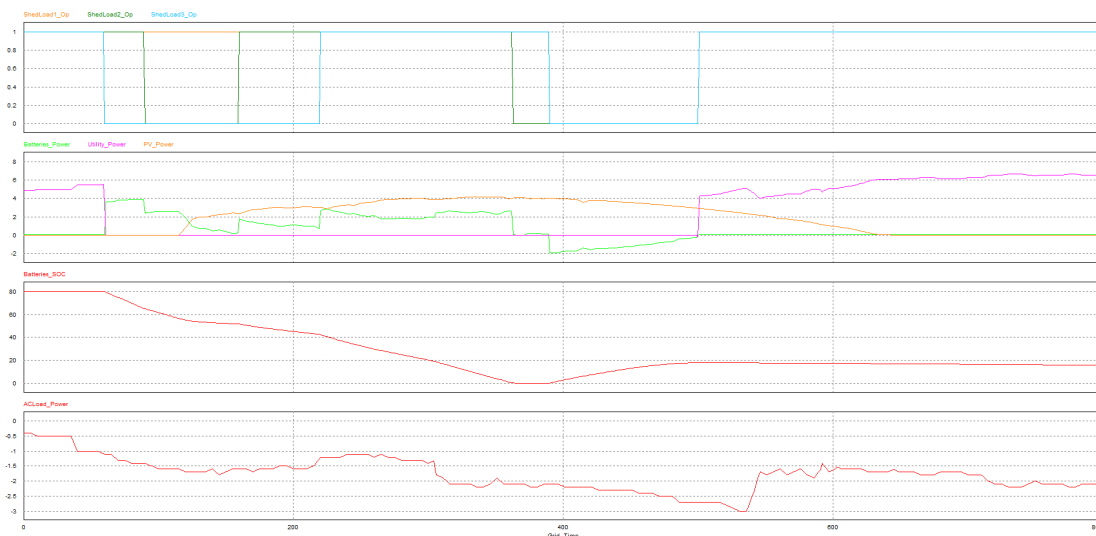


FIGURA 8.9: Modo de tempo mínimo garantido de operação, caso 2.

Observa-se que o sistema somente religa as cargas quando existe energia nas baterias suficiente para operá-las durante o seu tempo mínimo de operação. Desta forma evita-se o chaveamento frequente de cargas, evitando mudanças rápidas nos *set-points* de potência das baterias e melhorando a experiência dos consumidores.

### 8.3.3 Modo ótimo baseado em previsões

O modo ótimo é capaz de antecipar variações de demanda e geração e agir de modo a evitar o chaveamento constante das cargas, mas mesmo assim ainda garantindo um tempo mínimo de operação da microrrede em situação de contingência.

A figura 8.10 exibe o comportamento do sistema para situações iguais de demanda e geração da figura 8.9.

Vê-se que quando a contingência ocorre o sistema de descarte opta por não descartar nenhuma carga, utilizando a energia armazenada na bateria para alimentar todas as cargas. Isto acontece pois o sistema antecipa a geração solar no futuro próximo e conclui que haverá energia para abastecer toda microrrede por um certo tempo, atrasando o desligamento das cargas.

Enquanto que o sistema de descarte por tempo mínimo garantido acaba por chavear as cargas duas vezes (figura ??), o sistema ótimo as mantém em operação e as desliga somente quando necessário, garantindo menor intermitência na entrega de energia para

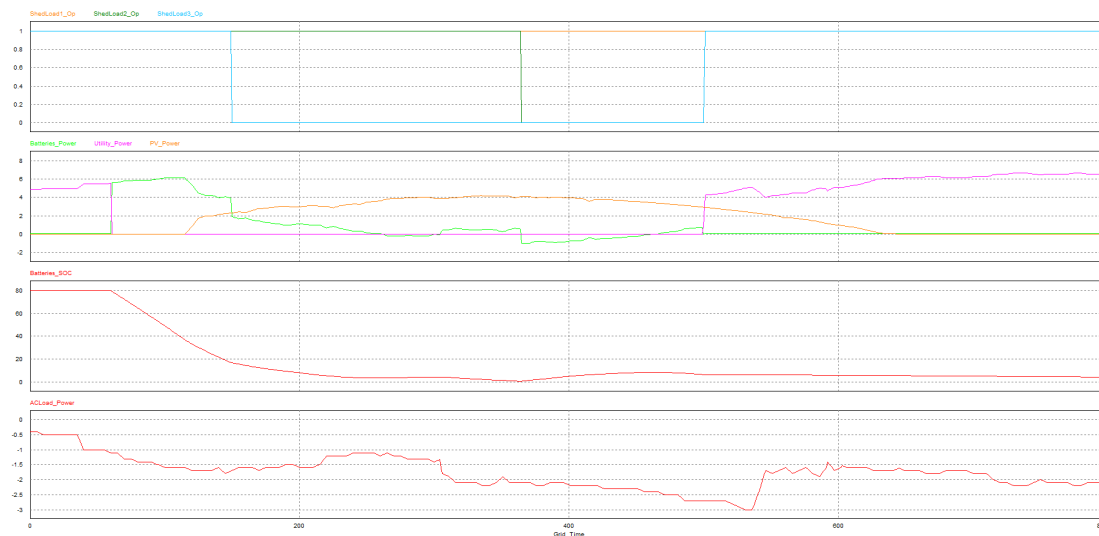


FIGURA 8.10: Modo ótimo baseado em previsões, primeiro caso.

o consumidor que, neste caso, só vai “perceber” a queda da rede aproximadamente 1h30min depois da falha.

Este comportamento fica ainda mais claro na figura 8.11.

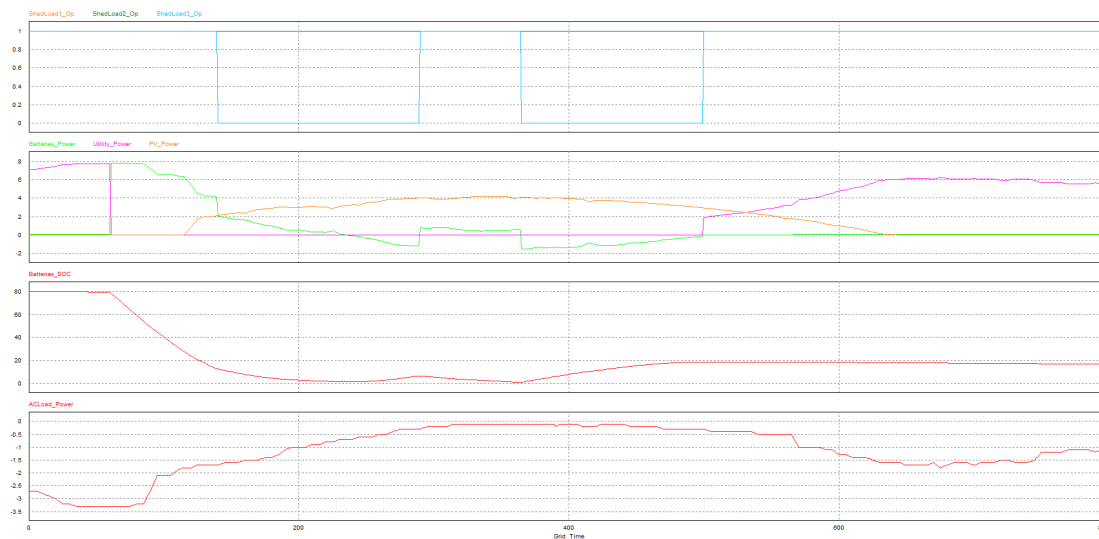


FIGURA 8.11: Modo ótimo baseado em previsões, segundo caso.

Aqui nota-se que a GD aparece no mesmo instante que nos casos anteriores e isto ainda coincide com uma diminuição na demanda. Enquanto que o sistema de descarte exibido em 8.3.2 chavearia as duas cargas logo no momento de ocorrência da contingência (pois a demanda é alta e não há geração), o sistema ótimo proposto é capaz de antecipar as

necessidades energéticas da microrrede e agir de acordo, chaveando apenas uma das três cargas.

Vê-se que o sistema opera em níveis baixos de carga na bateria, chegando próximo de zero muito antes de decorridos os 300 minutos a serem atendidos. Isto pode ser bastante problemático se as previsões de demanda e geração apresentarem erros grandes.

## Capítulo 9

# Conclusões e Perspectivas futuras

Durante o período de trabalho, o aluno familiarizou-se com os diferentes aspectos envolvidos na implantação e operação de uma microrrede, desde sua concepção até a implementação de funcionalidades exercidas pelos controladores locais. O aluno participou ativamente na modelagem de uma microrrede na plataforma Simulink, desenvolvendo uma ferramenta de grande utilidade para análise do comportamento dinâmico de elementos da microrrede e da interação entre estes. Além disso, ainda participou no aperfeiçoamento do simulador estático da microrrede, expandindo suas funcionalidades para melhor refletir as reais necessidades do projeto.

O desenvolvimento das simulações dinâmicas se mostrou de grande serventia para o projeto, disponibilizando em uma plataforma consolidada um modelo complexo e ao mesmo tempo de execução rápida, reflexo das necessidades dos envolvidos neste trabalho. Este simulador permitiu uma compreensão profunda do comportamento dos controladores de *droop* inseridos em cenários reais (na presença de fontes isócronas, em modo ilhado, em modo de reconexão e outros) além de demonstrar as dinâmicas relacionadas ao chaveamento de cargas, bem como o efeito da inserção de impedâncias virtuais nos modelos de inversores.

O trabalho realizado em cima da plataforma de simulação estática desenvolveu diferentes métodos de administração das baterias e descarte de cargas, tarefa de grande importância. Com a redução dos custos dos equipamentos e aumento nos custos e demanda de energia, espera-se que cada vez mais consumidores finais da rede se tornem agentes ativos, participando em programas de resposta à demanda e também através da

geração de energia distribuída. Este aspecto é um grande motivador para o desenvolvimento de controladores locais nas residências e é uma tendência que já se observa em países onde este cenário é mais evoluído.

A análise de produtos de prateleira como os descritos anteriormente também foi um meio de colocar em perspectiva o desenvolvimento dos controladores locais, e de conhecer que tipos de protocolos são mais utilizados para comunicação entre estes equipamentos, assim como suas funcionalidades essenciais e seus diferenciais.

Futuramente espera-se desenvolver uma plataforma integrada de simulação (estática e dinâmica) de microrredes, onde o usuário seja capaz de entrar com dados de incidência solar, velocidade do vento, perfis de demanda e topologia da rede no simulador estático para, em seguida, simular dinamicamente eventos isolados, como mudanças de *set-point*, chaveamento de cargas, falhas na rede e ressincronização com a rede principal.

As estratégias desenvolvidas apresentam também uma implementação preliminar do controlador local, podendo inclusive ser utilizada no controlador central da microrrede quando couber a este o chaveamento de cargas não prioritárias em situações de contingência.

De modo geral, o trabalho desenvolvido foi importante para um estudante de controle e automação, expondo o aluno a aspectos diversos em um contexto amplamente multidisciplinar. Durante o curso, pouco se falou de eletrônica de potência, uma área que só tende a crescer com o advento das microrredes, e que é muito dependente do controle. Este período permitiu ao aluno contextualizar-se com relação aos elementos mais básicos envolvidos na modelagem de sistemas de potência, o que se provou útil mesmo em outras etapas do projeto.

O curso de ECA da UFSC sempre se orgulhou do seu conteúdo multidisciplinar, que permite aos seus estudantes atuarem em diversas frentes e debater de igual para igual com profissionais de áreas distintas. É sentimento do aluno que este período de estágio no CES foi engrandecedor neste sentido: o de permitir ao aluno diversificar suas opções profissionais ao fim do curso.

# Bibliografia

- [1] Altino Ventura FILHO. Energia elétrica no brasil: Contexto atual e perspectivas. *Interesse Nacional*, (21), Junho 2013. URL <http://interessenacional.uol.com.br/index.php/edicoes-revista/energia-eletrica-no-brasil-contexto-atual-e-perspectivas/>.
- [2] Bp statistical review of world energy. Junho 2014. URL <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>.
- [3] A. Carlsson. The back to back converter: Control and design. Maio 1998.
- [4] D. Maksimovic R. W. Erickson. Fundamentals of power electronics. Janeiro 2001.
- [5] J. M. Guerrero L. J. C. Neto S. S. Carvalho R. P. Torrico-Bascope F. K. A. Lima, C. G. C. Branco. Analysis, modelling, and simulation of droop control with virtual impedance loop applied to parallel ups systems. *IECON 2013*, 2013.
- [6] J. C. Vasquez J. M. Guerrero C. Li, S. Chaudhary. Power flow analysis for droop controlled lv hybrid ac-dc microgrids with virtual impedance. 2014.
- [7] R. H. Park. Two-reaction theory of synchronous machines: Generalized method of analysis - part i. *Transactions of the AIEE*, (48):716–730, 1929. URL <https://ece.uwaterloo.ca/~ccanizar/papers/classical/park.pdf>.
- [8] A. Madureira J. P. Lopes, C. Moreira. Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2):916–924, Maio 2006.
- [9] M. Prodanovic C. Hernandez-Aramburo T. Green E. Barklund, N. Pogaku. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of



- inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(5):2346–2352, Setembro 2008.
- [10] J.F. Manwell. Kibam battery model. Dezembro 2004. URL <http://www.ceere.org/rerl/projects/software/batteryModel.html>.
- [11] M.R. Jongerden e B.R. Haverkort. Battery modeling. *Centre for Telematics and Information Technology, University of Twente*, 62, 2008. URL <http://link.aip.org/link/?RSI/62/1/1>.