

Gerenciamento Energético para Microrredes Inteligentes

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Victor Maryama

Florianópolis, julho de 2013

Gerenciamento Energético para Microrredes Inteligentes

Victor Maryama

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Cesare Quinteiro Pica
Orientador na Empresa

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer
Orientador no Curso

Prof. Ricardo José Rabelo
Responsável pela Disciplina

Prof. Nestor Roqueiro
Avaliador

Gabriel Alexandre Bertolini Landeira
João Bruno Abou Hatem de Liz
Debatedores

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos meus colegas de trabalho do Centro de Energia Sustentável da CERTI pelo convívio nestes meses de estágio e especialmente a meu orientador, Cesare Quinteiro Pica, pelo apoio e confiança durante este período.

Também agradeço aos colegas e professores do INEP e do LabPlan, com os quais muito aprendi durante este trabalho.

Finalmente, agradeço à minha namorada Giovanna por todo amor e companheirismo e, em especial, agradeço aos meus pais Lilia e Yoshimi e à minha irmã Alexandra, sem os quais esta conquista não teria sido possível e cujo apoio e carinho sempre foram os maiores motivadores para mim.

Resumo

No Brasil, assim como em uma grande quantidade de países, há uma constante busca pela utilização mais eficiente dos recursos energéticos e da infraestrutura de transmissão e geração. Atualmente, as smart e microgrids consistem em uma nova frente na busca de eficiência ao propor que os consumidores industriais, comerciais e residenciais utilizem localmente a microgeração, o armazenamento de energia e utilização de ferramentas de controle e análise da qualidade de energia. Apesar da redução dos custos dos microgeradores, o desconhecimento da interação destes equipamentos com as instalações do consumidor e com a rede se torna uma barreira para sua utilização em larga escala. Torna-se crítico, assim, aprender e desenvolver técnicas para controlá-los. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um gerenciador energético para microrredes que desempenhasse a função de despacho energético das fontes utilizando diferentes estratégias. Para avaliação das mesmas, foi desenvolvido também um simulador no qual os dispositivos da microrrede foram modelados e por meio do qual o comportamento da rede operando sob cada uma das estratégias foi estudado. Este projeto, no contexto do qual o trabalho se enquadra, é pioneiro ao desenvolver microrredes no Brasil.

Abstract

In Brazil - and in other countries as well - there is a growing need for more efficient utilization of the available energetic resources and transmission and distribution infrastructure. Today, smart and microgrids stand out as solutions taking advantage of more intelligent analysis and control devices, where consumers become also producers by using distributed energy resources such as photovoltaic panels, small wind turbines and energy storage. Despite the continuous reduction of the costs for systems like these, the lack of knowledge concerning the interaction of these microsources with the consumer facilities and with the main grid is still a barrier for further adoption of these technologies. Therefore, it becomes critical to learn and develop techniques to operate and control distributed energy resources. The goal of this work was to develop a microgrid energy management system to coordinate the operation of the microsources using different dispatch strategies, such as Load-following, Cycle-charging and Optimal dispatch. In order to evaluate the benefits of each strategy, a simulator was developed in which all the electric devices were modeled and the behavior of the microgrid operating under each one of the strategies was studied.

Sumário

Agradecimentos.....	4
Resumo	5
Abstract	6
Sumário	7
Capítulo 1: Introdução	10
1.1: O problema energético.....	10
1.2: Fontes alternativas e geração distribuída	12
1.2.1: Mudança de paradigma.....	13
1.3: Smart Grid.....	14
1.4: Microrredes Inteligentes.....	16
1.5: Tendências	17
1.6: Motivação.....	18
1.7: Organização do trabalho.....	18
Capítulo 2: Descrição do Projeto	19
2.1: Apresentação.....	19
2.2: Especificação do Projeto.....	20
2.2.1: Barramento em Corrente Contínua	20
2.2.2: Conversores estáticos bidirecionais	22
2.2.3: Barramentos em Corrente Alternada	22
2.2.4: Conexão com a rede elétrica principal	24
2.2.5: Sistema de controle e supervisão.....	24
2.3: Conclusão	25
Capítulo 3: Definição do problema	26
3.1: Introdução	26
3.2: O Problema: Balanço energético	26

3.3: Formas de despacho de fontes.....	27
3.3.1: Carregamento Cíclico (cycle-charging)	27
3.3.2: Despacho periódico baseado em previsões	29
3.3.3: Divisão de carga baseada em nível de frequência	30
3.4: Conclusão	33
Capítulo 4: Atividades no Projeto	34
4.1: Introdução	34
Divisão de carga baseada em frequência	34
4.2: Necessidade de validação por simulação	34
4.3: Tarefas realizadas.....	35
Capítulo 5: Projeto e Desenvolvimento do Simulador Estático.....	37
5.1: Objetivo	37
5.2: Funcionamento geral	37
5.3: Modelagem das fontes	38
5.3.1: Dados de Demanda e Recursos Naturais	38
5.3.2: Fontes renováveis	38
5.3.3: Fontes despacháveis.....	39
5.3.4: Baterias	40
5.3.5: Características de Droop (fontes despacháveis e baterias) .	45
5.3.6: Comportamento elétrico da rede	46
5.3.7: Estratégia de despacho das fontes na microrrede	48
Capítulo 6: Implementação do Simulador Estático	51
6.1: Escolha de ferramentas e tecnologias	51
6.2: Programação.....	52
6.2.1: Implementação das geradores	52
6.2.2: Implementação da rede elétrica	54
6.2.3: Estratégias de despacho das fontes (objetos Dispatcher)....	56

6.3: Execução do simulador	60
Capítulo 7: Gerenciador Energético e Sistema de Comunicação	62
7.1: Comunicação da Microrrede	62
7.1.1: O Protocolo Modbus	63
7.2: Implementação do Controlador Central	65
7.3: Testes de comunicação	66
Capítulo 8: Resultados	68
8.1: Exibição dos resultados	68
8.2: Dados de entrada.....	69
8.2.1: Perfil de Carga.....	69
8.2.2: Perfis de geração renovável	69
8.3: Estratégia de Carregamento Cíclico	70
8.4: Estratégia de Load-following	72
8.4.1: Duas fontes despacháveis (microturbina)	72
8.4.2: Bateria como gerador isócrono.....	74
8.5: Despacho ótimo baseado em previsão	75
Capítulo 9: Conclusões e Perspectivas	77
Bibliografia:.....	79
Anexo I	80

Capítulo 1: Introdução

1.1: O problema energético

Nos últimos anos, nota-se uma crescente preocupação em relação à problemas relacionados a Energia no mundo todo. O fenômeno do aquecimento global, ocasionado pela emissão de CO₂, juntamente com poluição causada na extração de matéria-prima energética têm a utilização de combustíveis fósseis como principal vilão. Além disso, comenta-se, com cada vez mais frequência, sobre a possibilidade de exaustão das fontes de combustíveis fósseis nos próximos anos – das quais fazem parte o carvão e o petróleo. O conjunto destes fatores reflete em dificuldades maiores (tanto legais quando financeiras) para se construir usinas para geração de energia.

Desta forma, líderes e pesquisadores ao redor do mundo desde já buscam soluções que visam evitar que o assunto Energia se torne um gargalo para a população mundial no futuro – uma vez que projeções estimam que o consumo mundial de energia aumente em torno de 50% no ano de 2035, aumento que pode ser atribuído ao desenvolvimento de países emergentes, como a China.

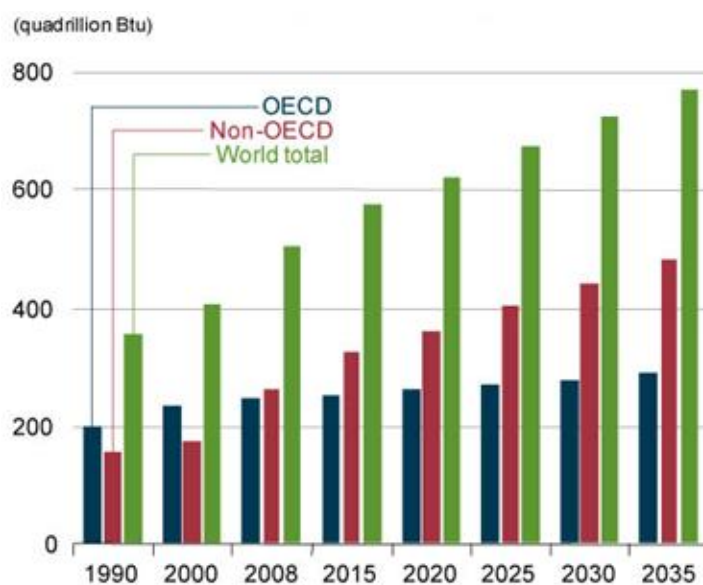


Figura 1 - Consumo mundial de energia (1990 até 2035).

<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>

No Brasil, esta tendência também se mostra presente. Se, por um lado, a população brasileira atualmente cresce em ritmo menor ao de anos atrás, os empecilhos para a construção de usinas – tanto hidrelétricas quanto térmicas – aumentaram consideravelmente. Projeções mostram que a tendência do consumo de energia elétrica é de crescer em torno de 4% ao ano até 2022, quando teremos uma demanda por energia elétrica 60% maior do que no ano de 2012.

Tabela 1 - Previsão do consumo de energia elétrica no sistema interligado nacional

Ano	Norte	Nordeste	Sudeste/CO	Sul	Total
2012	4.749	11.472	49.292	15.657	79.017
2013	6.513	12.058	52.213	16.563	84.462
2014	6.964	12.601	54.316	17.000	87.887
2015	7.407	13.136	56.324	17.451	91.213
2016	7.608	13.704	58.427	18.092	94.610
2017	7.852	14.365	60.770	18.773	98.410
2018	8.096	15.026	63.063	19.479	102.185
2019	8.448	15.663	65.440	20.212	106.151
2020	8.810	16.324	68.044	20.972	110.394
2021	9.073	17.066	70.748	21.736	114.719
2022	9.359	17.822	73.365	22.532	119.029

http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20130117_1.pdf

Os sistemas elétricos tradicionalmente podem ser divididos em três componentes: Geração, Transmissão e Distribuição. Os consumidores, então, recebem energia elétrica partir dos sistemas de transmissão (geralmente maiores consumidores) ou de distribuição (o qual engloba os consumidores residenciais). De uma forma geral, as soluções propostas - que atacam este problema em várias frentes – podem ser classificadas em dois grandes grupos:

- Aproveitamento sustentável de fontes alternativas de energia, de forma a manter a capacidade de fornecimento de energia. As soluções dizem respeito o segmento de geração de energia;
- Medidas de eficiência energética, que buscam diminuir o ímpeto da crescente necessidade de energia ao tornar o sistema mais eficiente. As soluções, neste caso, compreendem os sistemas de transmissão, distribuição e também o próprio consumo;

1.2: Fontes alternativas e geração distribuída

Tradicionalmente, o sistema elétrico (tanto no Brasil quanto em outras partes do globo) foi concebido para comportar grandes usinas de geração elétrica. Na matriz energética brasileira, tais fontes consistem em usinas hidrelétricas (mais de 70% da capacidade instalada) e térmicas (15% aproximadamente) [1]. Devido a restrições ambientais, a construção de usinas hidrelétricas com grandes reservatórios de água é bastante restrita, diminuindo a capacidade de utilizar-se este tipo de energia. As centrais termelétricas, por sua vez, possuem a desvantagem de, além de poluentes, terem um custo elevado de combustível para operação e geração de energia elétrica.

Em vista desses problemas, houve um crescente interesse em fontes alternativas de energia elétrica, como a utilização de geradores eólicos, cujos parques já são atualmente responsáveis por 2% da capacidade instalada no Brasil [2].

Diferentemente destes grandes empreendimentos de energia, cada vez mais recursos são investidos em projetos de **geração distribuída**. Tal conceito corresponde à utilização de diversas fontes de energia de menor porte em áreas próximas aos centros consumidores. Nesse contexto, se destacam principalmente a utilização de painéis fotovoltaicos, geradores eólicos de pequeno porte e geradores utilizados como alternativas a quedas na rede elétrica, como geradores a diesel e microturbinas a gás, por exemplo. Além destes, podemos citar a inclusão de sistemas de armazenamento de energia – tipicamente banco de baterias – como também outras fontes ditas alternativas de geração de energia, tais como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), Biomassa e células a combustível.

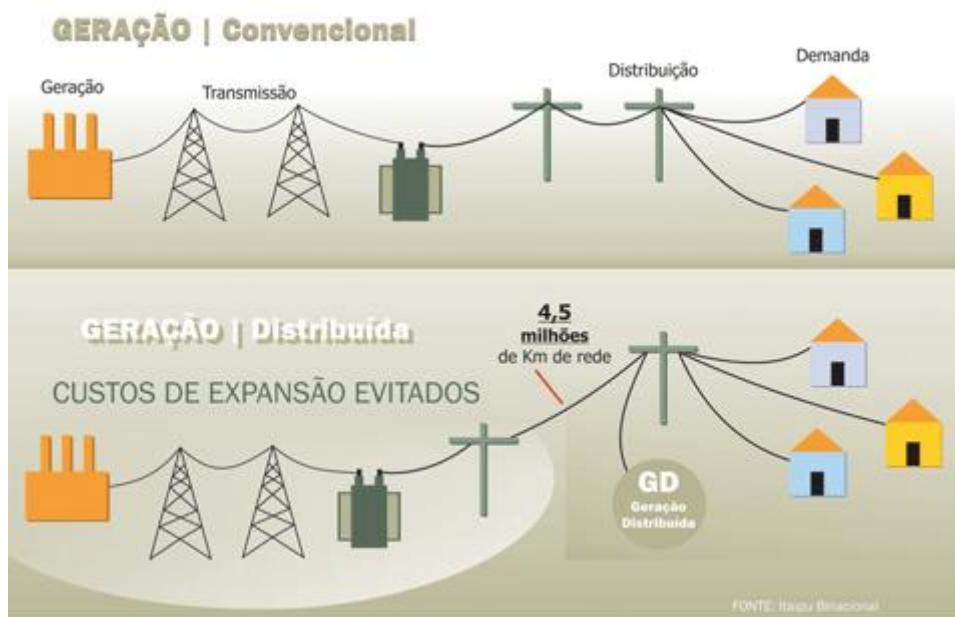


Figura 2 - Geração Distribuída (Fonte: Itaipu Binacional)

Dentre os principais benefícios da geração distribuída pode-se citar:

- Menor investimento inicial – tanto no empreendimento em si quanto relacionado à construção de grandes linhas de transmissão de energia;
- Maior confiabilidade - uma falha em uma usina de grande porte pode deixar milhões de consumidores sem energia;
- Menos perdas relacionadas à transmissão e distribuição de energia - no Brasil as perdas correspondem em média a 16% da geração total de energia elétrica.

Como desvantagem, podemos apontar o custo ainda relativamente elevado das tecnologias – o que vem diminuindo continuamente nos últimos anos - e a maior complexidade de operação do sistema elétrico devido à intermitência e incerteza inerentes a geração fotovoltaica e eólica, no sistema de distribuição.

1.2.1: Mudança de paradigma

Podemos perceber, portanto, que a geração distribuída traz os elementos de geração de energia para perto dos consumidores: Efetivamente, os mesmos

se tornarão também produtores ao instalarem dispositivos de microgeração em suas residências, podendo mesmo exportar energia elétrica para a rede. Desta forma, é necessário estabelecer procedimentos e tecnologias próprias para coordenar, gerenciar e satisfazer o balanço entre geração e demanda de energia nesta nova topologia de rede elétrica onde o consumidor tem participação ativa no sistema e o fluxo de energia é bidirecional.

1.3: Smart Grid

Smart Grid corresponde a uma ideia no qual as redes elétricas são modernizadas com sistemas de informação e comunicação de modo a coletar dados e agir (muitas vezes de forma automatizada) visando melhorias na eficiência, confiabilidade e qualidade dos serviços, visando possibilitar a mudança de paradigma citada no capítulo anterior. Portanto, mais do que um conjunto específico de tecnologias, trata-se fundamentalmente de uma nova visão do sistema elétrico que engloba diversos itens como:

- Operação de geração e armazenamento distribuídos;
- Veículos elétricos recarregáveis;
- Automação residencial;
- *Self-healing* (autocorreção de faltas)
- Maior interação e participação do consumidor
 - Como produtor (fluxo bidirecional)
 - Resposta da demanda¹
- Maior competição no mercado de energia elétrica

Tais conceitos foram concebidos com diversos objetivos, dentre os quais aprimorar a eficiência do sistema (aumentando a disponibilidade do sistema e reduzindo perdas) e a aumentar a qualidade percebida pelo cliente final (maior controle, conscientização e melhores serviços acerca da utilização da energia elétrica).

¹ Operação no qual os consumidores, através de incentivos, se comprometem a reduzir o consumo de energia elétrica quando necessário (períodos de pico, racionamento, entre outros).

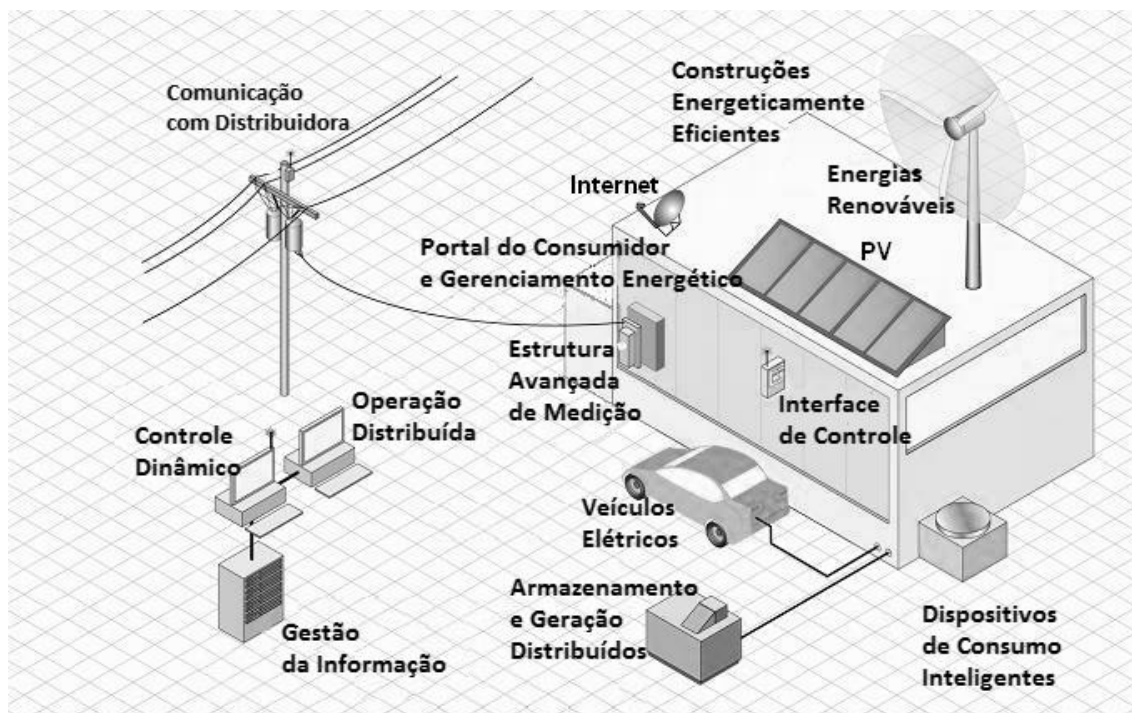


Figura 3 - Exemplo da visão Smart Grid

http://news.cnet.com/8301-11128_3-20001009-54.html

Existe, portanto, a necessidade de concepção e utilização de diversas tecnologias de informação e comunicação para a viabilização destas funcionalidades. Dentre elas, a AMI (Advanced Metering Infrastructure) possui papel fundamental ao utilizar medidores inteligentes para colher dados – em tempo real – que servirão para um melhor acompanhamento da utilização de energia pelos clientes, para tratamento e análise de modo a identificar e prever falhas no sistema de transmissão/distribuição e para prover informação de base para os mais diversos tipos possíveis de operações automatizadas.

Desta forma, a interoperabilidade entre equipamentos se torna uma questão primordial, onde a escolha de protocolos de comunicação é importante e a definição de padrões possibilitará um avanço significativo do Smart Grid na rede elétrica atual. A tecnologia de microrredes, descrita a seguir, engloba grande partes destas funcionalidades.

1.4: Microrredes Inteligentes

Microrredes podem ser definidas como a agregação de cargas e geração distribuída, em geralmente baixa tensão, que se comportam (em relação ao exterior) como uma única unidade controlada que pode tanto operar conectada à rede elétrica principal (podendo manter níveis determinados de exportação/importação de energia) quanto ilhada, operando autonomamente no caso de uma falha no sistema de transmissão/distribuição. Podem ser constituídas por indústrias, clientes como universidades, hospitais ou até mesmo pequenas comunidades ou regiões municipais.

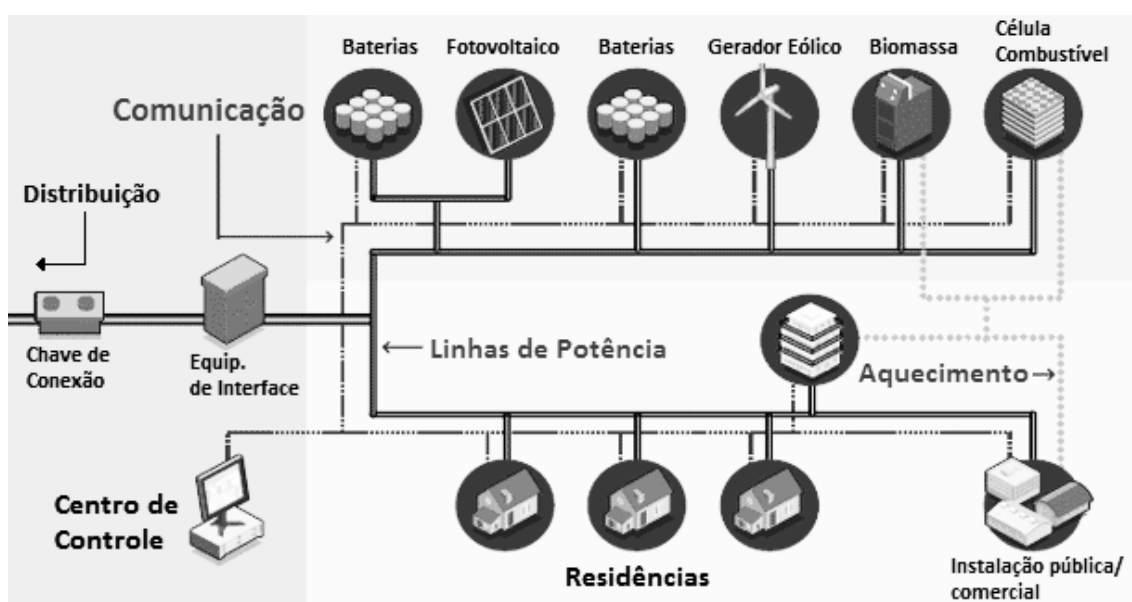


Figura 4 - Exemplo de Microrrede

<http://electrical-engineering-portal.com/the-challenge-of-protecting-microgrids-alstom>

Os elementos de geração de energia numa microrrede correspondem normalmente a fontes renováveis de geração (geradores eólicos de menor porte e painéis fotovoltaicos) em conjunto com sistemas de backup formados possivelmente por microturbinas a gás ou geradores a diesel.

Na prática, as microrredes se comportam efetivamente como redes de distribuição ativas, uma vez que é composta de dispositivos inteligentes necessários para coordenar tanto a operação das fontes e cargas internas

(balanço energético entre geração e consumo) quanto o comportamento em relação à rede elétrica exterior. Ela poderia, por exemplo, estabelecer um determinado fator de potência no ponto de conexão com a distribuidora ou mesmo fornecer determinada quantidade de potência reativa, caso necessário. Operações como resposta de demanda (no caso de geração insuficiente) e autocorreção de falhas (*self-healing*) podem ser aplicados da mesma forma. Para se realizar todas as funções necessárias, é preciso dispor de uma estrutura de medição, comunicação e controle, nos moldes daqueles preconizados pela visão de Smart Grids.

De fato, autores [3] sugerem que as microrredes poderão ser os elementos construtivos do novo paradigma de redes elétricas inteligentes no futuro, consistindo da interação entre diversas microrredes para prover os serviços ligados à energia elétrica e movendo a inteligência de operação para a ponta do sistema, caracterizando-se assim um sistema genuinamente distribuído.

1.5: Tendências

A tendência mundial é motivadora. Com inúmeros projetos pilotos já em funcionamento, até 2020, as receitas no mercado de microrredes ultrapassarão o valor de 40 bilhões de dólares [4], movendo a indústria para o patamar de comercialização em larga escala, devido a eventos climáticos catastróficos que diminuem a confiabilidade do sistema elétrico, ao custo elevado de combustíveis fósseis em lugares remotos e também à possibilidade de as microrredes serem provedoras de serviços de resposta a demanda.

No Brasil, até o presente momento, não se tem notícias de microrredes pilotos em operação. O desenvolvimento deste projeto é, portanto, pioneiro no país.

1.6: Motivação

Apesar da redução dos custos dos equipamentos, o desconhecimento da interação da microrrede com as instalações do consumidor e com a rede elétrica se torna uma barreira para sua utilização em larga escala. Torna-se crítico, assim, aprender e desenvolver técnicas para controlá-los, possibilitando sua exploração comercial.

Desta forma, a empresa Tractebel Energia se mostra disposta a explorar e investir nesse tipo de tecnologia por meio de um projeto de P&D com foco em microrredes inteligentes com o objetivo conceber uma possível solução que possa aumentar a qualidade do fornecimento de energia elétrica de seus clientes.

1.7: Organização do trabalho

Este estágio de fim de curso se insere no contexto deste projeto de P&D Tractebel em microrredes. O presente relatório se divide da seguinte forma:

O capítulo 1 introduz brevemente o assunto microrredes.

No capítulo 2 é detalhado o projeto, especificando e descrevendo cada equipamento e a concepção da microrrede de uma forma geral.

O capítulo 3 apresenta e detalha o problema de gerenciamento energético em microrredes, para o qual soluções foram buscadas neste trabalho de fim de curso.

O capítulo 4 especifica as atividades realizadas neste projeto.

Os capítulos 5, 6 e 7 mostram e explicam as soluções adotadas e suas implementações.

Finalmente, os capítulos 8 e 9 mostram e analisam os resultados obtidos, terminando com comentários a respeito das realizações do trabalho e preconizações para futuros projetos.

Capítulo 2: **Descrição do Projeto**

2.1: Apresentação

O projeto de P&D em microrredes inteligentes da Tractebel Energia nasceu da busca de soluções que possam agregar valor aos seus clientes não somente devido ao fornecimento de energia elétrica, mas também do ponto de vista de confiabilidade (ao torná-los menos vulneráveis a falhas da rede elétrica principal) e da sustentabilidade (por meio da utilização de fontes de energias renováveis como energia eólica e solar).

O objetivo é desenvolver uma microrrede piloto de maneira a testar e validar seus benefícios, bem como compreender de que maneiras ela pode se relacionar com a rede elétrica principal e com os consumidores, tanto na parte técnica quanto na parte financeira e de regulação.

O projeto foi concebido em conjunto com instituições que são referência em diversos domínios tecnológicos diferentes:

- **Centro de Energias Sustentáveis (CES)**, Fundação CERTI.

O CES participa como entidade executora, responsável pelo gerenciamento técnico do projeto, participando ativamente, sobretudo, no que diz respeito ao estudo e implementação de tecnologias de controle, supervisão e comunicação da microrrede.

- **Laboratório de Eletrônica de Potência (INEP)**, UFSC/EEL

Especialista na parte de processamento de energia elétrica, qualidade de energia e conversores estáticos, o INEP é responsável pelo projeto e especificação dos elementos de processamento de energia na microrrede.

- **Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan)**, UFSC/EEL

Com foco em planejamento e análise de sistemas de energia elétrica (geração, distribuição e transmissão), o LabPlan é responsável pela definição dos aspectos relacionados à estratégia de operação dos dispositivos da microrrede.

2.2: Especificação do Projeto

No contexto do projeto e previamente à realização do estágio, foi concebida uma microrrede de acordo com o diagrama do **Anexo I**. Ela é basicamente composta por barramentos que podem ser de dois tipos: Corrente Alternada (CA) ou Corrente Contínua (CC). Estes barramentos contêm os elementos de geração e consumo da microrrede e o fluxo de potência entre estes dois barramentos é realizado por meio de conversores estáticos bidirecionais. Existe também, além dos elementos elétricos, uma camada de comunicação, controle e supervisão responsável pela operação da microrrede.

Uma descrição mais detalhada destes elementos é dada a seguir.

2.2.1: Barramento em Corrente Contínua

Consiste em um barramento único de 380V C.C. que compreende os dispositivos elétricos que trabalham naturalmente em corrente contínua. Alguns deles contêm conversores de interface com o barramento, utilizados para compatibilizar diferenças no nível de tensão entre a saída da fonte e o barramento C.C.

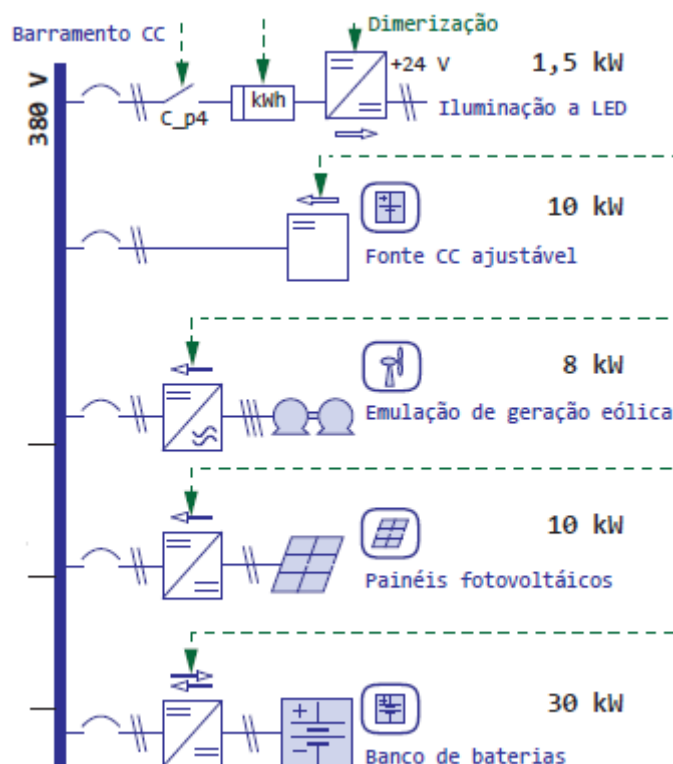


Figura 5 - Barramento CC

Os dispositivos conectados a este barramento são:

- **Painéis fotovoltaicos (10 kW)**

Painéis fotovoltaicos da marca Kyocera. Estes painéis operarão no ponto de máxima potência, extraindo e injetando energia na microrrede de acordo com a disponibilidade de radiação solar.

- **Emulador de geração eólica (8 kW)**

Este emulador é composto por um gerador elétrico conectado a um motor elétrico, que é comandado de modo a simular a resposta de turbinas eólicas típicas sob diversas velocidades de vento.

- **Fonte de corrente contínua ajustável (10kW)**

Esta fonte será utilizada para fins de teste, simulando quaisquer outros tipos possíveis de dispositivos de geração.

- **Banco de baterias (6.5 kWh de capacidade)**

Banco de baterias de lítio-ion, tecnologia que é tendência mundial em aplicações de smart grid e veículos elétricos. No caso da bateria, o conversor estático faz o papel de carregador da mesma.

Sua presença na microrrede é essencial tanto como dispositivo armazenador de energia quanto para a estabilidade da mesma em situações de transitórios, onde o balanço energético deve ser satisfeito em situações nas quais ações de controle ainda estão sendo aplicadas. Como exemplo, em caso de repentina queda do fornecimento de energia por parte da rede elétrica principal, a bateria forneceria energia para as cargas enquanto dá-se a partida do grupo gerador a diesel.

- **Iluminação a LED (1,5kW)**

LEDs são dispositivos de iluminação que trabalham naturalmente em corrente contínua. Estes LEDs tem a capacidade de serem controlados, ajustando remotamente a luminosidade gerada e conseqüentemente o seu consumo.

2.2.2: Conversores estáticos bidirecionais

A conversão da energia entre o barramento C.C e C.A é realizada através de conversores estáticos chaveados. Foi escolhida a utilização de três deles em paralelo, de modo a garantir redundância de operação e divisão da potência processada.

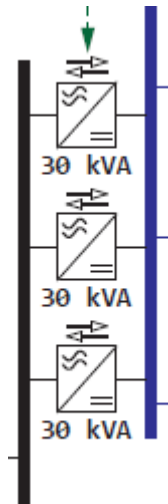


Figura 6 - Conversores bidirecionais

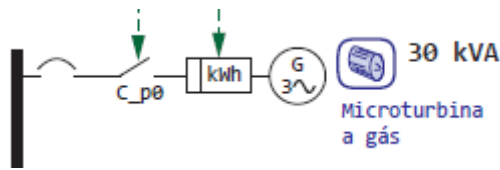
Estes conversores estão sendo desenvolvidos pelo INEP.

2.2.3: Barramentos em Corrente Alternada

Estes barramentos trifásicos operando em 380V C.A comportam todas as cargas (que não a iluminação LED) da microrrede e o restante dos dispositivos de geração. É interessante observar a presença de diversos contadores (denominados C_{px}) que permitem desconectar diversas porções da microrrede (geradores individuais e cargas não-prioritárias). Além disso, diversos medidores de grandezas elétricas estão distribuídos pelos alimentadores, cujas leituras serão utilizadas para monitoramento e controle da microrrede.

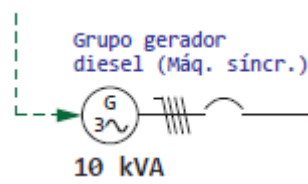
A seguir uma descrição dos dispositivos presentes nos barramentos C.A:

- **Microturbina a gás (30 kVA)**



Operada seja a gás natural ou gás liquefeito de petróleo (GLP). Principal fonte a ser utilizada em casos de operação autônoma, com capacidade para suprir a carga da microrrede em sua plenitude.

- **Gerador a diesel (10 kVA)**



Este gerador reflete a presença de grupos de geração a diesel utilizados para fins de backup em locais onde o mesmo é necessário. Na microrrede, servirá como backup no caso de problemas com outras fontes de geração.

- **Cargas prioritárias e não-prioritárias C.A.**

A microrrede contém cargas que podem ser divididas em um grupo de cargas prioritárias e dois grupos de cargas não prioritárias.

As cargas prioritárias não podem ser desconectadas da microrrede, enquanto que as cargas não-prioritárias podem ser descartadas caso seja necessário - devido a alguma contingência na qual a geração de energia se torne suficiente, por exemplo.

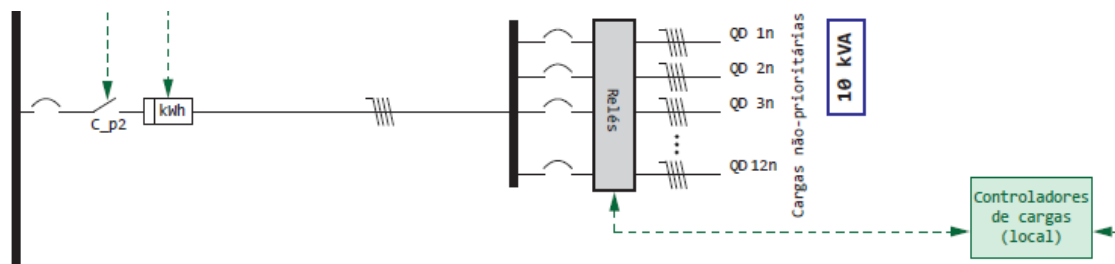


Figura 7 - Cargas não-prioritárias

A natureza destas cargas ainda será definida, mas refletirão o uso de energia de diversos tipos de cargas presentes nos clientes atualmente (cargas resistivas, motores, entre outros).

2.2.4: Conexão com a rede elétrica principal

A conexão com a rede elétrica principal se dá por meio da chave de transferência (denominada S_{ger} no diagrama), conectada ao barramento de 380V C.A. da distribuidora.

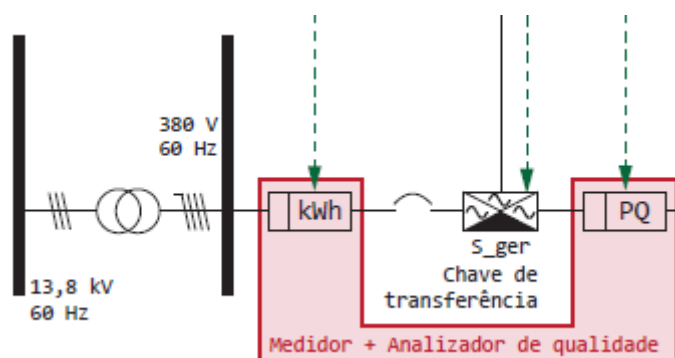


Figura 8 - Conexão com a rede elétrica principal

A chave de transferência utilizada consiste de elementos de estado sólido, denominadas chaves estáticas. Esta chave será comandada de modo a realizar a conexão e desconexão tanto à rede elétrica principal, quanto ao gerador a diesel.

No ponto de conexão com a distribuidora, também, existem medidores e equipamentos analisadores da qualidade de energia elétrica tanto da rede elétrica principal quanto da microrrede. Estes dados serão utilizados para as decisões de ilhamento/reconexão da microrrede com a rede principal.

2.2.5: Sistema de controle e supervisão

Paralelo a todos os dispositivos citados até agora, um sistema de comunicação, controle e supervisão estará presente de modo a coordenar a operação dos mesmos, realizando as seguintes funções:

- **Despacho das fontes de geração e armazenamento da microrrede;**

Geradores como o diesel e a microturbina, bem como o banco de baterias podem ter seus níveis de geração ou consumo (no caso da bateria)

controlados. A definição destes níveis deve ser realizada pelo controle central da microrrede, de modo a sempre garantir o balanço entre geração e demanda.

- **Coordenação da conexão/desconexão e operação da chave de transferência**

É necessária a presença de algum tipo de controle responsável pela verificação da atual condição do sistema e pela atuação sobre a chave de transferência para conectar ou desconectar a microrrede da rede elétrica principal.

- **Coordenação do descarte de cargas do sistema**

É necessário um sistema que coordene o enfraquecimento da iluminação a LED e a operação dos contadores de descarte de cargas não-prioritárias em situações nas quais tal operação é necessária.

- **Monitoramento das principais variáveis do sistema**

É preciso que um sistema SCADA torne as principais informações da microrrede disponíveis para eventuais operadores responsáveis da microrrede.

- **Comunicação**

Um sistema de comunicação, por sua vez, é necessário para viabilizar a troca de informações entre os dispositivos que participarão das funções supracitadas.

2.3: Conclusão

Neste capítulo foi dada uma breve descrição dos objetivos e dos elementos que compõe o projeto de P&D em microrredes. Fica evidente que grande parte dos desafios da operação da microrrede diz respeito ao controle responsável pelas várias funções descritas acima.

Os problemas específicos ao controle da microrrede – ou seja, ligadas ao gerenciamento energético da mesma – serão abordados nos seguintes capítulos.

Capítulo 3: **Definição do problema**

3.1: Introdução

Como comentado no capítulo anterior, existem diversas funções que precisam ser desempenhadas por algum tipo de controle na microrrede para a sua operação. Dentre elas, um foco especial será dado à coordenação da operação dos geradores e cargas da microrrede, já que esta função é de fundamental impacto no atendimento da demanda, uma vez que qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia para a carga é objetivo fundamental de uma microrrede.

3.2: O Problema: Balanço energético

Qualquer sistema de energia elétrica, de forma geral, tem a função de garantir o pleno fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Em outros termos, isto significa que é necessário manter sempre um balanço entre geração e demanda, de forma que exista um equilíbrio entre a energia gerada e a consumida.

Em um sistema elétrico, consumidores conectam e desconectam dispositivos (cargas) de acordo com a sua necessidade. Para atender essa necessidade de energia, é preciso que os geradores presentes no sistema regulem o nível de geração de eletricidade para garantir o fornecimento, variando de acordo com este consumo que, embora em média possa seguir padrões repetitivos, é impossível de ser previsto com 100% de precisão.

A situação de desbalanceamento entre demanda e geração deve ser evitada, pois pode acarretar em problemas no sistema elétrico, fazendo com que níveis de tensão e frequência saiam da faixa de trabalho ideal e possivelmente causem danos a equipamentos de geração ou transmissão/distribuição de energia e até mesmo aos equipamentos do consumidor.

Todas essas características citadas para um sistema elétrico também são válidas para uma microrrede, que consiste, basicamente, em uma versão de menor porte de um sistema de energia elétrica. É preciso, portanto, saber de que forma as fontes da microrrede podem ser gerenciadas de modo a atender a demanda das cargas por energia.

Neste capítulo descreveremos diferentes formas de resolver esta questão.

3.3: Formas de despacho de fontes

Existem diversas maneiras de coordenar o despacho das fontes de modo a atender a demanda. Dentre elas, algumas das mais utilizadas foram escolhidas para este trabalho:

- Carregamento cíclico (cycle-charging)
- Despacho ótimo periódico baseado em previsões (otimização)
- Divisão da carga entre geradores baseada em nível de frequência (controle por droop)

Neste projeto, todas estas abordagens foram estudadas e analisadas. A seguir entraremos em detalhes sobre cada uma, enfatizando seus pontos principais.

3.3.1: Carregamento Cíclico (cycle-charging)

Esta estratégia tem como elemento central o conjunto de armazenamento de energia, como o banco de baterias. Nela, tenta-se suprir a demanda da microrrede inteiramente pelas fontes renováveis e pela carga da bateria. Se, em média, o consumo for maior que a geração renovável, a bateria descarregar-se-á para manter o balanço energético do sistema. Dessa maneira, a carga da bateria – conhecida como *State of Charge* (SOC) – indica efetivamente eventuais déficits ou superávits de geração de energia.

Os geradores despacháveis, então, como os geradores a diesel ou microturbina a gás, permanecem desligados até que carga da bateria atinja um nível crítico, indicando necessidade de geração adicional. Neste momento, eles entram gerando sua potência nominal, atendendo a carga e recarregando as

baterias. No momento em que ela estiver cheia, eles são desligados novamente, retornando ao estado inicial no qual a bateria e as fontes renováveis são os únicos responsáveis pelo atendimento à carga. Os valores limites de carga para o início de operação dos geradores e desligamento dos mesmos são arbitrários, sendo valores típicos 40% e 80% respectivamente.

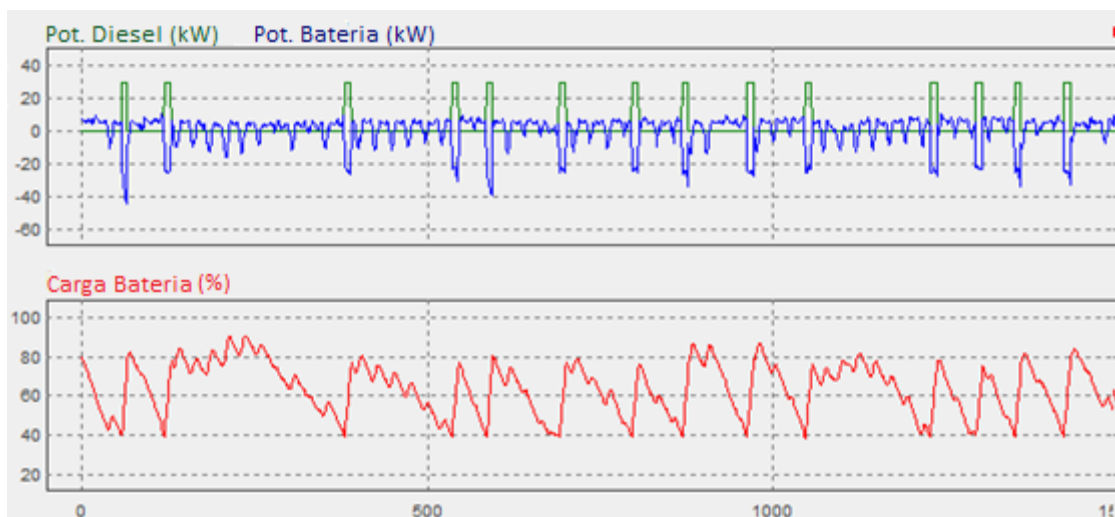


Figura 9 - Exemplo da estratégia de carregamento cíclico (limites de carga da bateria em 40% e 80%)

Esta estratégia é a mais utilizada em equipamentos comerciais e alguns dos motivos responsáveis pela sua larga utilização são:

- Eficiência dos geradores

Esta técnica leva em consideração o fato que operar os geradores fora da potência nominal, com baixo carregamento, é prejudicial para a máquina e resulta em pífios rendimentos.

- Simplicidade de operação

A operação dos geradores neste modo é simples, uma vez que o despacho é baseado sobre uma única variável (carga da bateria) e existe basicamente um único nível de geração para as fontes (nível máximo), o que torna este método aplicável com geradores mais simples que não dispõem de nenhum tipo de controle da potência gerada.

A estratégia de carregamento cíclico será a base de comparação em relação as técnicas seguintes.

3.3.2: Despacho periódico baseado em previsões

Este método é análogo ao utilizado em sistemas de energia elétrica tradicionais. Consiste em calcular, periodicamente, as referências de geração de cada fonte do sistema baseando-se em previsões do estado futuro do sistema. No caso da microrrede em questão, estas previsões englobam tanto a demanda futura quanto as condições naturais para as fontes de energia renováveis (solar e eólica). O objetivo deste cálculo é encontrar a melhor combinação de geração, dentre todas as fontes, que garanta o atendimento da demanda com o menor custo de operação possível.

A periodicidade de cálculo dos níveis de despacho e o horizonte de predição dependem essencialmente da variabilidade das grandezas consideradas e da confiabilidade das previsões das mesmas, que são, nesse caso, a **demanda** e o **nível de geração renovável** do sistema.

Em sistemas de grande porte, a variabilidade da demanda tende a ser menor devido ao grande número de consumidores, característica essa que se torna mais pronunciada no caso de uma microrrede, onde cada unidade consumidora tem um impacto maior na demanda global. Além disso, a geração eólica depende da velocidade do vento, que pode variar consideravelmente, enquanto nuvens no céu podem fazer com que o nível de geração fotovoltaica mude abruptamente.

Esta periodicidade, portanto, deve ser suficientemente frequente para que a microrrede não opere por um longo período de tempo de maneira sub-ótima, sob dados incorretos. Os valores considerados para o projeto giram em torno de 24 horas para o horizonte de previsão, com uma periodicidade da casa dos minutos.

Otimização

Os valores efetivos de despacho das fontes são encontrados por meio de um problema de otimização, onde as **referências de geração** de cada fonte são as **variáveis de otimização**.

Este problema deve levar em consideração, além das previsões de demanda e geração renovável, **restrições** como níveis máximos/mínimos de

geração de cada uma das fontes, limites na taxa de variação da potência das mesmas, capacidade da bateria, entre outros fatores.

A **função objetivo** deste problema corresponde à minimização do custo de operação do sistema, como os custos dos combustíveis, mas que também pode englobar emissões de gases do efeito estufa. Esses custos se refletem através de funções dependentes dos níveis de geração de cada fonte – ou seja, as próprias variáveis de otimização.

3.3.3: Divisão de carga baseada em nível de frequência

Uma limitação do método de previsão é que, como previamente salientado, a demanda e a geração renovável não podem ser previstas com 100% de precisão. Somado a isto existe o fato de que estes valores podem mudar também **entre** os pontos de cálculo do despacho ótimo das fontes, durante o tempo entre um cálculo e outro.

Nessa situação, é possível que tais variações ocasionem um desbalanceamento momentâneo entre geração e demanda, podendo trazer consequências indesejadas - já mencionadas neste capítulo - para a microrrede. Para resolver este problema, pode-se utilizar a técnica descentralizada de divisão de carga baseada em nível de frequência, também conhecida como controle “Droop”. Esta técnica se aplica apenas a sistemas de corrente alternada.

Controle por Droop dos geradores

Esta técnica nasceu da característica que geradores síncronos possuem de diminuir sua velocidade angular com um aumento de carga, criando, portanto, uma relação – tipicamente linear - entre a frequência da tensão gerada e a potência assumida pelo mesmo em **regime permanente**. Efetivamente, variações na potência consumida pelo sistema causam variações na frequência dos geradores (e consequentemente da microrrede como um todo).

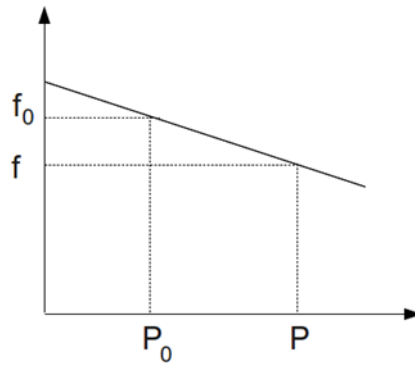
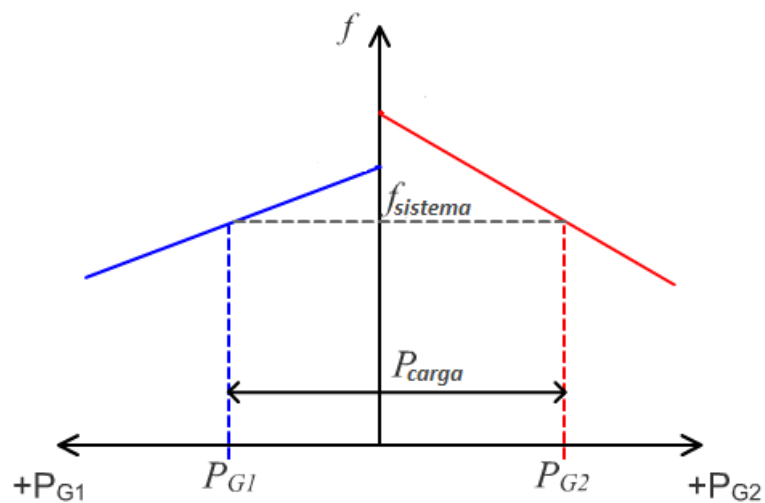
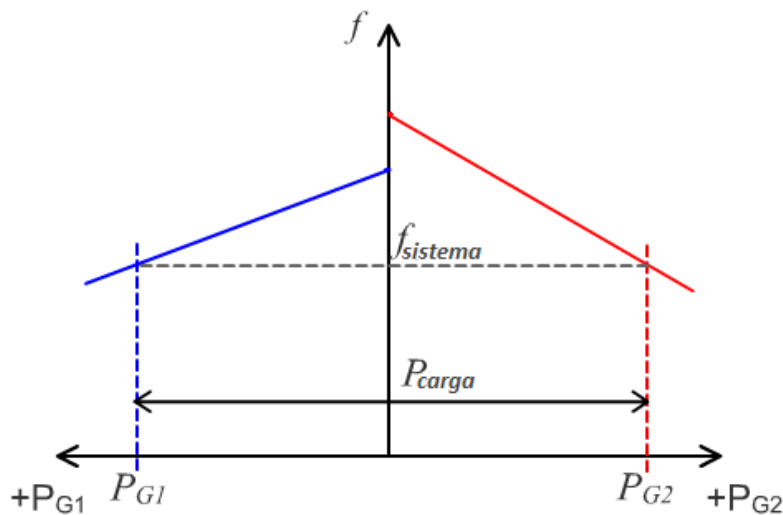


Figura 10 - Característica (curva) de Droop

Dado que as linhas que ligam as fontes às cargas sejam predominantemente indutivas, a divisão de potência entre as fontes depende em última instância da característica de variação da frequência em função da potência gerada, isto é, da curva de droop. Nesse caso, a frequência da rede funciona de fato como um sinal que indica uma mudança no patamar de carga da rede, sendo que a resposta de cada gerador a este sinal depende justamente da inclinação da sua curva característica de droop.



(a)



(b)

Figura 11 – Diagrama mostrando o comportamento do sistema para dois patamares de carga diferentes. Na Figura (b) vemos que a frequência cai com o aumento de carga, e a distribuição desta potência entre as fontes depende das retas de droop de cada uma.

Fonte:

http://www.ece.ualberta.ca/~knight/electrical_machines/synchronous/parallel/finite_bus.html

De uma forma geral, quando existe excesso de geração na rede, a frequência da rede sobe e as fontes respondem a este aumento de frequência diminuindo seus respectivos níveis de geração. Analogamente, quando existe um déficit de geração, a frequência cai e as fontes aumentam seus níveis de geração proporcionalmente.

Embora a base da teoria seja a característica típica de geradores síncronos, fontes baseadas em conversores estáticos podem simular este mesmo comportamento.

A vantagem deste método é a ausência de necessidade de uma ligação externa de comunicação para a coordenação da divisão das cargas na microrrede, uma vez que ela é feita automaticamente por meio da frequência e das características de droop, conferindo à rede a possibilidade de adicionar fontes de modo plug-and-play.

É importante ressaltar que, utilizando este método, a frequência desviará de seus valores nominais, sendo, portanto, importante estabelecer um desvio máximo de frequência aceitável para a divisão de cargas (tipicamente 5%). Além disso, considerações elétricas dinâmicas sobre a estabilidade do sistema devem ser estudadas no projeto dos conversores de potência que programarão efetivamente o controle droop.

3.3.3.1: Controle droop em redes de corrente contínua

A técnica de controle por droop, como mencionado anteriormente, é aplicada em sistemas em corrente alternada, nos quais existe uma frequência de oscilação das grandezas elétricas do sistema. A microrrede do projeto, no entanto, apresenta também um barramento em corrente contínua.

Efetivamente, o mesmo conceito de controle droop poderia ser aplicado para coordenação de fontes no barramento CC utilizando o **nível de tensão** – em vez da frequência – como sinal de orientação para as fontes. Neste caso, as características de droop das fontes no barramento em corrente contínua teriam a potência gerada variando em função do nível de tensão do barramento. Mais detalhes sobre o método podem ser vistos em [5].

O controle droop em redes de corrente contínua não será estudada neste trabalho.

3.4: Conclusão

Na microrrede objeto deste projeto, os três métodos são avaliados. O carregamento cíclico será comparado com o despacho periódico baseado em previsão, que é utilizado complementarmente com o controle por droops: Referências periódicas são enviadas às fontes, baseadas em previsão, enquanto que erros na previsão e variações de demanda entre os momentos de cálculo da otimização são absorvidos pelo modo de compartilhamento de carga por frequência.

Veremos a seguir o desenvolvimento e implementação das técnicas e ferramentas que permitiram estudar o problema de despacho na microrrede.

Capítulo 4: **Atividades no Projeto**

4.1: Introdução

No contexto deste projeto de fim de curso, a principal atividade desenvolvida consistiu na implementação da função de gerenciamento das fontes da microrrede em um controlador, chamado de Controlador Central da Microrrede, além de um simulador para validação dos algoritmos desenvolvidos.

Este capítulo será dedicado a questões de implementação dos métodos de gerenciamento energético das fontes da microrrede descritas no capítulo anterior.

Divisão de carga baseada em frequência

O método baseado em frequência, se tratando de um método distribuído, é implementado em nível dos conversores das fontes e dos geradores, não sendo contemplado pelo controle central da microrrede. Este trabalho foi conduzido pelo Instituto de Eletrônica de Potência (INEP).

Despacho periódico baseado em previsões

O algoritmo de despacho ótimo baseado em previsões deve ser executado periodicamente pelo Controlador Central da Microrrede. A formulação do problema de otimização está sendo conduzida pelo Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan), sendo sua implementação responsabilidade do Centro de Energias Sustentáveis da CERTI, realizado neste trabalho de fim de curso.

4.2: Necessidade de validação por simulação

Como um requisito previsto para o projeto, uma das etapas do mesmo consiste na validação dos métodos apresentados por meio de simulações.

Estas simulações correspondem a períodos de discretização maiores (da ordem de minutos) e caracterizam a operação elétrica da microrrede durante períodos que podem chegar a até um ano, permitindo visualizar o custo total de operação da mesma. Diferem, portanto, de simulações que permitem verificar transitórios elétricos que ocorrem na casa dos milissegundos, trabalhando apenas com as fontes em regime permanente. Por isso, este simulador é chamado de **simulador estático**.

Um simulador como tal pode ajudar a definir questões sobre a necessidade de previsões extremamente precisas da demanda e da geração renovável, que exige ferramentas complexas e trabalho adicional sobre algoritmos de previsão. Pode-se quantificar até que ponto a qualidade da previsão afeta o custo de operação da microrrede.

Além disso, o simulador permitirá comparar a efetividade do despacho baseado em previsão com diferentes estratégias de despacho, o que será detalhado nos capítulos posteriores.

Após busca extensa, *não* foram encontradas plataformas de simulação que satisfizessem os requisitos necessários para o projeto:

- Bons modelos de fontes
- Plataforma aberta
- Possibilidade de implementação arbitrária de controladores (incluindo resolução de problemas de otimização).
- Boa extensibilidade

4.3: Tarefas realizadas

Desta forma, no contexto deste estágio, as seguintes atividades foram realizadas:

- Estudo sobre estratégias de despacho de fontes para microrredes (teoria desenvolvida nos capítulos anteriores);
- Implementação do gerenciador energético (Controlador Central) em um computador;

- Definição e implementação de funções de comunicação (protocolos);
- Desenvolvimento de uma plataforma de simulação estática da microrrede, com modelagem dos dispositivos e implementação do gerenciador energético.

Os detalhes destas atividades serão apresentados nos capítulos subsequentes.

Capítulo 5: Projeto e Desenvolvimento do Simulador Estático

5.1: Objetivo

A função do simulador estático é, basicamente, servir como uma plataforma na qual:

- Estejam presentes modelos realistas dos dispositivos da microrrede, tanto elétricos quanto do custo de utilização;
- Seja possível implementar diversos tipos de estratégias de controle e despacho destes dispositivos;
- Com os itens anteriores, comparar o comportamento da microrrede para diferentes estratégias de controle, visualizando o comportamento dos dispositivos e analisando sua operação em termos de custo de utilização e desgaste.

Essencialmente, é a ferramenta que permitirá quantificar em números os benefícios das estratégias consideradas e justificar, sem subjetividade, a escolha por uma delas.

5.2: Funcionamento geral

O simulador deve refletir com fidelidade o comportamento elétrico da microrrede durante sua operação, na qual a demanda e a geração renovável variam continuamente. Ele pode ser decomposto em três grandes blocos funcionais:

Modelagem elétrica e do custo de operação das fontes

Corresponde a definir, para cada dispositivo, suas curvas de custo baseado na potência gerada e utilização, bem como as características de variação em frequência do mesmo (droop) em função da potência gerada.

Comportamento elétrico da rede

De acordo com o que foi descrito no capítulo anterior, as fontes da microrrede incorporarão um controle droop para divisão distribuída de variações de demanda. O simulador deve refletir então as variações da frequência da rede na medida em que a demanda varia, o que vai, em última instância, coordenar a geração das fontes em regime permanente.

Estratégia de despacho das fontes da microrrede

Consiste na definição das diversas estratégias de definição das referências de geração na microrrede, que na prática corresponde à execução de algum tipo específico de algoritmo, executado periodicamente.

Cada um destes blocos funcionais será detalhado a seguir.

5.3: Modelagem das fontes

5.3.1: Dados de Demanda e Recursos Naturais

Os dados de entrada externos à simulação consistem em séries temporais de demanda, velocidade do vento e radiação solar durante um dado período.

5.3.2: Fontes renováveis

Os dados de vento e radiação solar são transformados em potência elétrica através de curvas características de turbinas eólicas e características típicas de painéis fotovoltaicos operando no ponto de máxima potência (MPP).

Para o gerador eólico, a curva característica que relaciona a potência gerada de acordo com a velocidade do vento é mostrada na Figura 12.

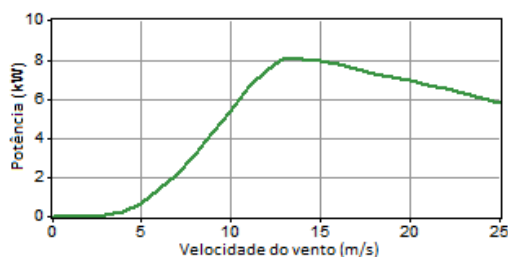


Figura 12 - Curva de potência (gerador eólico 8kW)

Para o painel fotovoltaico, a relação entre a potência gerada e a radiação solar é dada de acordo com a equação abaixo (painéis Kyocera):

$$P_{mp}(T, S) = N \cdot S \cdot (0,228 - 0,001065T)$$

Onde:

N : Número de módulos

T : Temperatura na superfície do módulo (°C)

S : Radiação solar (W/m²)

O total de potência renovável é abatido da demanda, resultando em uma demanda líquida a ser gerada pelas fontes despacháveis. O custo associado a essas fontes corresponde a O&M.

5.3.3: Fontes despacháveis

O gerador a diesel e a microturbina a gás foram modelados como fontes despacháveis operando em modo *droop*. O custo associado a estas fontes correspondem ao consumo de combustível, que depende da curva de eficiência destas máquinas. A capacidade de cogeração² da microturbina não foi levada em consideração neste momento no simulador.

² Cogeração é a capacidade de aproveitar-se o calor gerado no processo de combustão para aquecimento, o que eleva consideravelmente o rendimento do gerador.

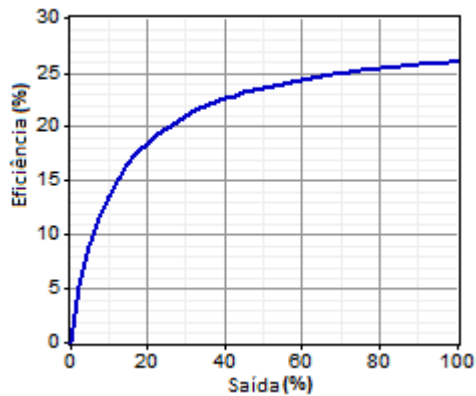


Figura 13 - Eficiência da microturbina (Capston C30)

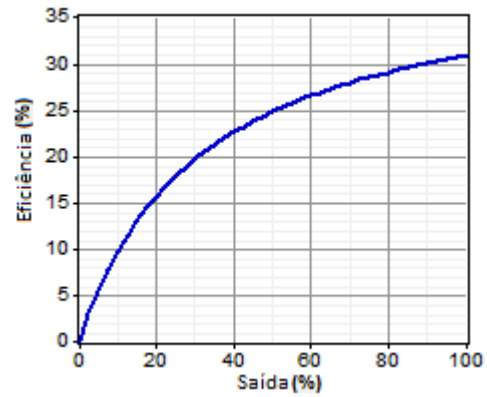


Figura 14 - Eficiência de gerador a diesel típico

5.3.4: Baterias

As baterias são os dispositivos cuja modelagem é a mais complexa. Buscou-se incorporar da forma mais fiel possível as características de uma bateria real, introduzindo limites de carga e descarga da mesma e contabilizando de maneira adequada a o seu desgaste.

O modelo escolhido para a bateria foi o Kinetic Battery Model (KiBaM), desenvolvido no Laboratório de Pesquisas em Energias Renováveis da Universidade de Massachusetts [3] [4] [5]. Neste modelo, a bateria é abstraída como um sistema com dois reservatórios (Figura 15):

O reservatório de energia disponível corresponde à quantidade de energia prontamente disponível para gerar potência elétrica. O reservatório de energia limitada, por sua vez, corresponde à energia armazenada nos elementos químicos da bateria, que pode ser transformada em energia disponível com uma taxa proporcional a uma constante ' k '. A proporção entre a capacidade dos dois reservatórios corresponde a outra constante denominada ' c '.

As constantes ' k ' e ' c ' são obtidas através da curva de Capacidade em função da Corrente de descarga (Figura 16).

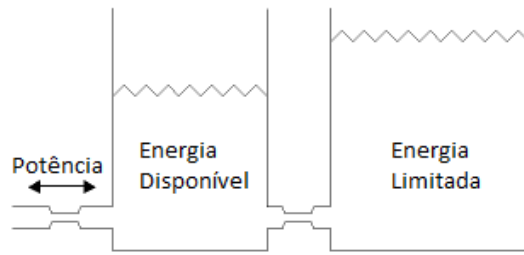


Figura 15 - Reservatórios do modelo
KiBaM

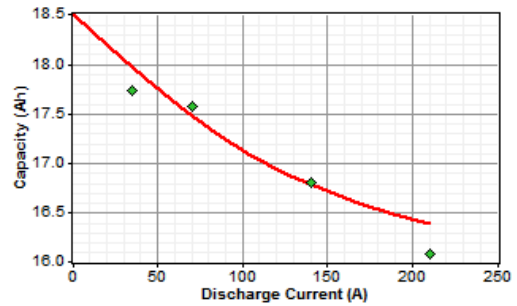


Figura 16 - Capacidade em
função da corrente de descarga

A dinâmica do fluxo de cargas entre os reservatórios reflete a diferença entre o nível dos dois reservatórios e é governada pelas seguintes equações:

$$\frac{dq_1}{dt} = -I + k \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = -k \cdot (h_2 - h_1)$$

Onde:

q_1 : Carga no reservatório de energia disponível

q_2 : Carga no reservatório de energia limitada

k : Constante relacionada à taxa de transferência entre os dois reservatórios

$h_1 = \frac{q_1}{c}$: Altura do reservatório de energia disponível

$h_2 = \frac{q_2}{1-c}$: Altura do reservatório de energia limitada

As equações acima foram derivadas para o simulador considerando correntes de descarga constantes durante entre dois instantes de tempo consecutivos.

Cálculo do desgaste

Uma vez com um modelo elétrico adequado para a bateria, o próximo passo foi modelar o custo de utilização.

A vida útil da bateria é uma característica que depende primordialmente da quantidade de ciclos de carga e descarga durante a operação, sendo que a profundidade destas cargas e descargas tem relevância fundamental na durabilidade da bateria – profundidades maiores trazem maiores reduções de vida útil. Fabricantes de baterias disponibilizam informações de número máximo de ciclos em função da profundidade de descarga *a partir da bateria 100% carregada*.

Entretanto, existem dois desafios na estimação da redução da vida útil da bateria com sua utilização:

- O perfil de carga/descarga da bateria, em vez de apresentar ciclos completos bem definidos, apresentam características complexas que num primeiro momento impossibilitam uma clara identificação dos ciclos e da profundidade dos mesmos;
- O efeito sobre a vida útil da bateria de ciclos de 10% com a bateria cheia (entre 100% e 90%) é diferente do efeito em diferentes níveis médios (entre 50% e 40%, por exemplo).

O primeiro problema é resolvido através de uma técnica utilizada também na análise de fadiga de materiais, conhecida como técnica de contagem *Rainflow* [6]. Nessa técnica, a contagem dos ciclos é feita baseada analogamente a filetes d'água que escorrem através dos picos. Desta forma é possível decompor um carregamento complexo em vários ciclos de carga com diferentes níveis médios e profundidades.

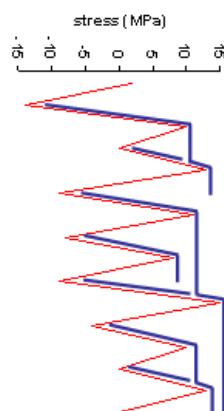


Figura 17 – Exemplo de contagem de semi-ciclos positivos através da técnica rainflow.

Tabela 2 - Exemplo de resultado de contagem para o caso da Figura 17

Stress	Ciclos	Semi-ciclos
10	2	0
13	0	1
16	0	2
17	0	2
19	1	0
20	0	1
22	0	1
24	0	1
27	0	1

O segundo problema é resolvido definindo-se uma curva inferior de tempo de vida útil que corresponde ao desgaste para ciclos que comecem e terminem com a bateria descarregada (partindo e voltando a 0% de carga). Esta curva (Figura 18 – Curva Inferior) é obtida através de uma ponderação entre a curva original e a linha de referência, que corresponde à menor vida útil possível da bateria (ciclos de 100% de profundidade):

$$C_{inferior} = Q * (C_{original} - C_{ref}) + C_{ref}$$

Onde:

Q : fator de ponderação entre zero e um.

Testes práticos desenvolvidos em [4] demonstram que um fator de ponderação de 0.1 é adequado que reflete com mais fidelidade o efeito de descargas em níveis menores de capacidade da bateria.

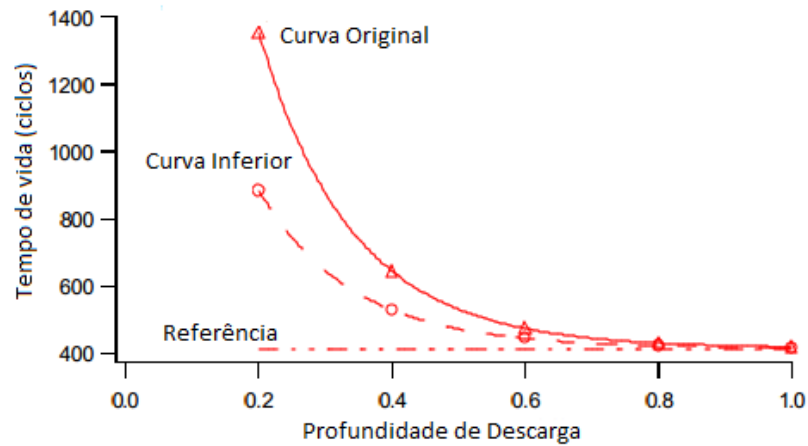


Figura 18 - Curva de tempo de vida de uma bateria

O efeito no tempo de vida útil dos ciclos de descarga que não se encontram em nenhum dos dois extremos (não chegam nem a 100%, nem a 0% de carga) é calculado a partir de curvas intermediárias linearmente interpoladas.

Por exemplo, referindo-se à Figura 18, a vida útil para uma **profundidade de descarga de 20%** é de:

- 1400 ciclos para ciclos entre 100% e 80% (curva original) da capacidade.
Cada ciclo completo desgasta 0,0007% da vida útil da bateria (1/1400).
- 900 ciclos para ciclos entre 0% e 20% (curva inferior) da capacidade da bateria.
Cada ciclo completo desgasta 0,001% da bateria (1/900).
- 1150 ciclos (média entre 1400 e 900) para ciclos entre 40% e 60% da capacidade da bateria, que corresponde ao ponto médio entre as curvas.
Cada ciclo completo desgasta 0,00087% da bateria (1/1150).

5.3.5: Características de Droop (fontes despacháveis e baterias)

As curvas de droop são definidas pela potência (P_0) na frequência nominal (f_0) e por sua inclinação, que define o quanto a potência varia em relação à frequência (ver 3.3.3: Figura 10).

A potência na frequência nominal (tipicamente 60 Hz) corresponde ao valor referência de geração a ser atribuído pelo algoritmo de despacho. Além disso, a inclinação da reta pode ser definida arbitrariamente, embora seja típico definir a inclinação de forma que as fontes cheguem a sua potência máxima de geração no maior valor permitido de excursão da frequência - por exemplo, 5% de diferença (57 Hz).

Uma característica interessante das curvas de droop consiste na possibilidade de se obter comportamentos distintos ao levar a inclinação para valores extremos:

- Para coeficientes extremamente grandes, a potência não varia de acordo com a frequência, atuando com potência constante (Figura 19).
- No caso de um coeficiente tendendo a zero, a fonte permite-se variar amplamente sua potência para valores infinitesimais de frequência, se comportando como uma máquina isócrona³, que absorve toda a variação de carga da rede e mantém a frequência no valor nominal (Figura 20).

³ As máquinas isócronas também são conhecidas como “swing machines”

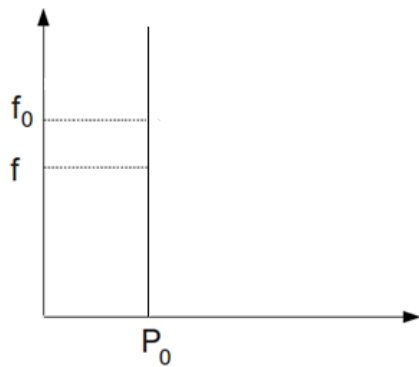


Figura 19 - curva droop p/ potencia constante

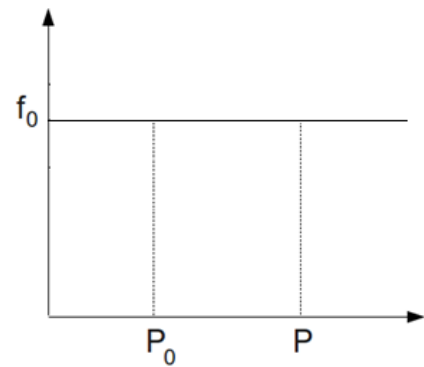


Figura 20 - curva de droop p/ frecuencia constante

5.3.6: Comportamento elétrico da rede

Como já descrito anteriormente, a interação das fontes e cargas neste simulador foi modelada através de características de droop. Dessa forma, existe uma relação de variação do nível de geração das fontes com a variação da frequência da rede.

A cada passo de simulação, o simulador deve abater a geração renovável da carga para obter uma carga líquida a ser suprida pelas fontes aqui ditas despacháveis – diesel, microturbina, bateria.

Sabemos, como explicado previamente, que a geração das fontes no fim depende da frequência através de suas curvas de droop. Portanto, queremos encontrar a frequência de equilíbrio na qual a soma total da geração das fontes se iguale à carga líquida de consumo.

Basicamente, procura-se buscar o valor de frequência que satisfaz a seguinte relação:

$$\sum_{n=1}^N G_n(f) - (\text{carga líquida}) = 0$$

Onde:

$G_n(f)$ Potência gerada pela fonte 'n' para a frequência 'f' (droop)

N Número de fontes despacháveis

Para encontrar esta frequência, o algoritmo realiza, para cada passo de tempo, as operações mostradas na Figura 21.

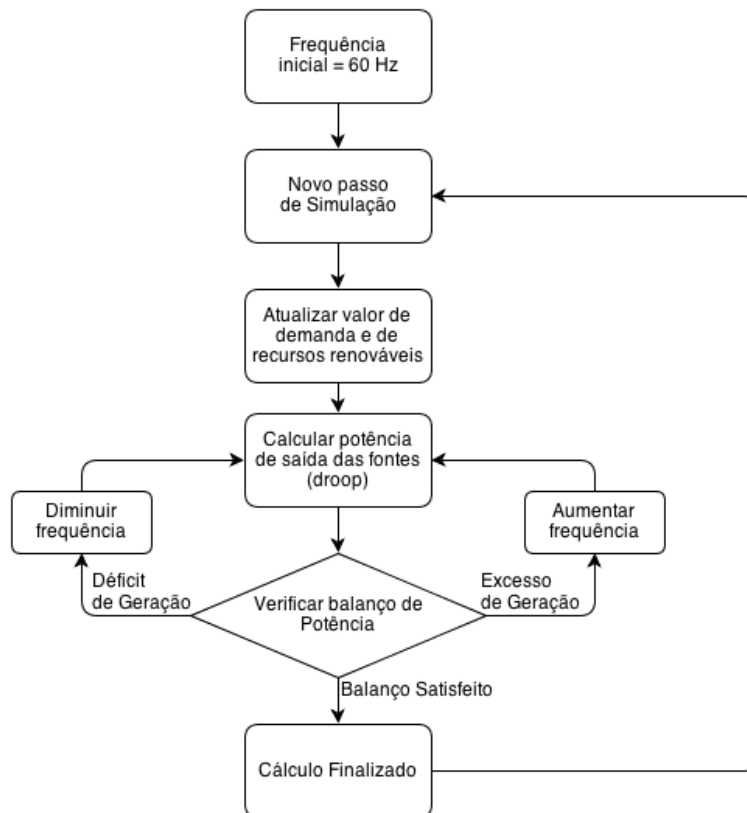


Figura 21 - Algoritmo iterativo para encontrar frequência de balanço energético

Deste modo, no decorrer da simulação a frequência da rede varia de acordo com o nível de demanda, coordenando a geração das fontes da microrrede.

5.3.7: Estratégia de despacho das fontes na microrrede

No simulador, deve ser possível a operação ilhada da microrrede de acordo com as seguintes estratégias:

Estratégia de *load-following*

As fontes, através da frequência e coeficientes de droop, operam livremente sem um controle centralizado e se ajustam para balancear sua geração com a demanda, de acordo com a explicação na seção 3.3.3:. Os valores de frequência e conseqüentemente de geração de cada fonte são encontrados de acordo com o algoritmo explicado na seção 5.3.6:.

Estratégia de carregamento cíclico (*cycle-charging*)

De acordo com o mencionado na seção 3.3.1:., a implementação desta estratégia de despacho se dá de acordo com a seguinte regra:

Se carga da bateria < Cmin:

Geradores despacháveis: Potência constante: máxima.

Se Carga da bateria > Cmax:

Geradores despacháveis: Potencia constante: zero.

Onde Cmin e Cmax correspondem aos níveis de carga da bateria (mínimo e máximo) que ativam os geradores. Tipicamente assumem valores mínimos de 30-40% e valores máximos de 70-80%. Nesse caso, não é interessante carregar a bateria em sua plenitude para que ela ainda tenha capacidade de absorver possíveis excedentes de energia na rede, caso a geração renovável supere o consumo da demanda.

Além disso, vale a pena mencionar que nesse modo os geradores despacháveis não variam seus níveis de geração com a frequência, mantendo sua saída constante igual ao valor de referência indicado pela regra.

Despacho ótimo baseado em previsão

Este método foi descrito na seção 3.3.2:.

O problema de otimização a ser resolvido será o que é conhecido como problemas de Programação Linear Inteira-Mista (MILP – Mixed-interger Linear Programming), e está sendo formulado pelo LabPlan/EEL. Esta categoria de

problemas de otimização consiste em funções-objetivo lineares, sujeita a restrições também lineares onde as variáveis de otimização podem assumir valores tanto contínuos quanto discretos.

Uma vez que a formulação do problema não está 100% definida pelos parceiros do projeto, o problema de otimização resolvido pelo algoritmo de despacho ótimo foi definido figurativamente de modo a simplesmente minimizar a utilização das fontes:

$$\text{minimizar } F = \sum_{k=1}^T \sum_{j=1}^J P_j$$

sujeito à (para todo instante 'k'):

$$\sum_{j=1}^J P_j(k) = D(k) - PV(k) - W(k) \quad (1)$$

$$E(k+1) = E(k) - P_{bat}(k) \quad (2)$$

$$E(0) = E_{inicial} \quad (3)$$

$$P_j \min < P_j(k) < P_j \max \quad (4)$$

Onde:

k : Instante de tempo no horizonte de previsão

T : Instante final do horizonte de previsão

P_j : Potência gerada pela fonte j

J : Número de fontes despacháveis do sistema

D : Demanda

PV : Geração solar fotovoltaica

W : Geração eólica

E : Carga da bateria

Basicamente, o algoritmo para este problema procurará uma solução que, baseado nas previsões de demanda e geração renovável, utilize a bateria da melhor forma possível para diminuir o uso das fontes despacháveis, respeitando condições de atendimento à demanda (1), nível de carga na bateria do instante atual e durante o horizonte de predição (2,3) e restrições de capacidade de operação (4).

É importante ressaltar que esta formulação tem o propósito apenas de validar a programação do código que calculará as soluções de otimização.

Capítulo 6: Implementação do Simulador Estático

6.1: Escolha de ferramentas e tecnologias

Linguagem de programação

Para a implementação do simulador, algumas linguagens de programação foram consideradas, levando em consideração requisitos como familiaridade, bibliotecas disponíveis, capacidade de expressão, portabilidade e velocidade de execução.

Tabela 3 - Comparativo entre linguagens de programação

	Familiaridade	Disponibilidade de Bibliotecas	Expressividade	Portabilidade	Velocidade
C	Boa	Boa	Baixa	Baixa	Ótima
Java	Ótima	Ótima	Boa	Ótima	Boa
Python	Ótima	Boa	Ótima	Ótima	Razoável

A linguagem escolhida para a implementação do simulador, portanto foi a linguagem **Java**, dado o conhecimento prévio de utilização da linguagem pelo autor deste trabalho, bem como a enorme quantidade de bibliotecas disponíveis na internet aliada ao fato de a velocidade de execução já ter deixado de ser um gargalo graças a evolução do compilador Just-in-Time. Somado a isso, a possibilidade de programação sob o paradigma de orientação a objetos foi considerada como essencial para o projeto.

Outro fator importante pela escolha da linguagem Java para implementação do simulador diz respeito a também utilização desta linguagem para a programação efetiva do dispositivo controlador central da microrrede. Detalhes sobre as decisões pertinentes a este dispositivo serão apresentados no capítulo seguinte.

Ambiente de desenvolvimento e ferramentas

Uma vez escolhida a linguagem de programação Java, foi decidida a utilização da ferramenta IDE **Eclipse**, que oferece uma gama ampla de funcionalidades para desenvolvimento nesta linguagem, além de diversos plug-ins que permitem ampliar ainda mais a capacidade do ambiente.

Além disso, tomou-se o cuidado de utilizar um sistema de controle de versão, no caso **Subversion** (SVN), de modo a manter uma rastreabilidade em relação às modificações realizadas no código e, ao mesmo tempo, servir como ferramenta de back-up do mesmo.

6.2: Programação

Neste trabalho buscou-se tirar proveito do paradigma de orientação a objetos ao utilizar-se diversos padrões de projeto para programação.

6.2.1: Implementação das geradores

Para a implementação das fontes (de geração) no simulador, procurou-se decompor e agrupar funcionalidades comuns a conjuntos diferentes de dispositivos. Decomposições funcionais como esta buscam evitar repetição de código ao fazer com que entidades semelhantes compartilhem a mesma implementação de funções, facilitando-se assim também futuras modificações da mesma.

Para tal, os objetos foram derivados, através de **herança**, de superclasses que representam as características gerais de cada dispositivo:

- Componente
 - Despachável
 - Bateria
 - Gerador Genérico (diesel ou turbinas a gás)
 - Não-despachável
 - Carga
 - Renovável
 - Gerador Eólico
 - Painél Fotovoltaico

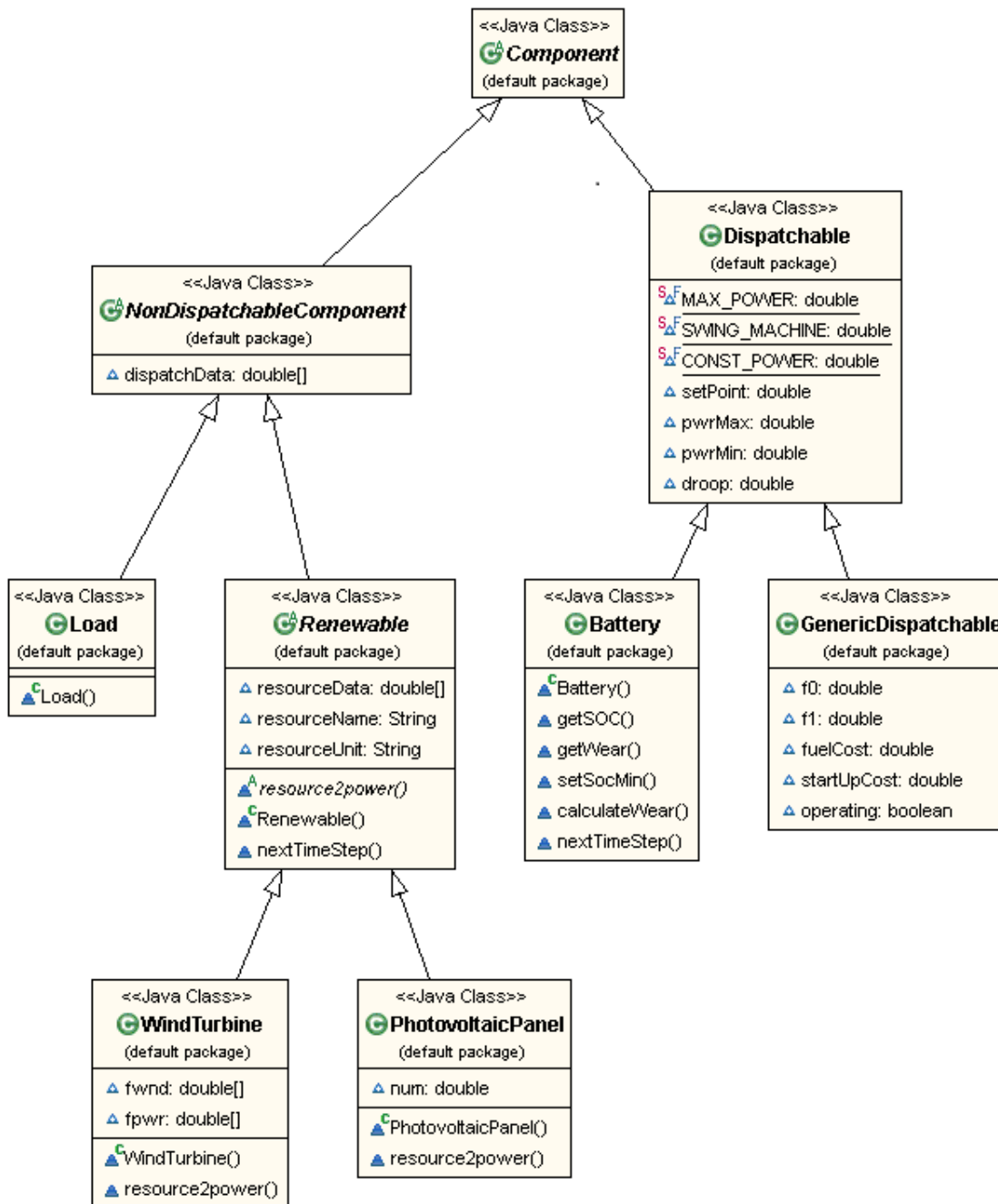


Figura 22 - Diagrama de Classes da implementação das fontes

Esta abordagem permite, por exemplo, levar a implementação do controle de potência por frequência (droop) para a classe Despachável, uma vez que estas características são comuns tanto a sistemas de bateria quanto a geradores a diesel ou microturbinas.

Da mesma forma, tanto a carga (demanda) quanto os geradores eólicos e fotovoltaicos atualizam seus dados de geração/consumo a cada passo de

simulação de acordo com valores pré-estabelecidos obtidos por arquivos com séries temporais dos mesmos. Tal funcionalidade é implementada na classe pai de componentes não-despacháveis.

As funções pré-definidas nas classes pai podem ser complementadas ou substituídas nas próprias as classes filhas caso alguma funcionalidade peculiar esteja presente, através da sobrecarga dos métodos herdados. As demais características específicas de cada dispositivo (sobretudo aquelas relacionadas a custo) foram implementadas nas suas respectivas classes.

6.2.2: Implementação da rede elétrica

O sistema elétrico da microrrede, que coordena o balanço de geração e demanda através da frequência da mesma, foi modelada por meio de uma classe chamada “Grid”, que contém as seguintes características:

- Um conjunto (Set) de objetos “Component” que correspondem aos dispositivos presentes na microrrede;
- Função `loadBalancing()`, responsável pelo deslocamento da frequência de modo a encontrar o valor de equilíbrio entre geração e demanda, de acordo com o algoritmo descrito na seção 5.3.6.;
- Referência para um objeto do tipo `Dispatcher`, que corresponde a implementações de estratégia de despacho das fontes. Será explicado com mais detalhes na seção seguinte.

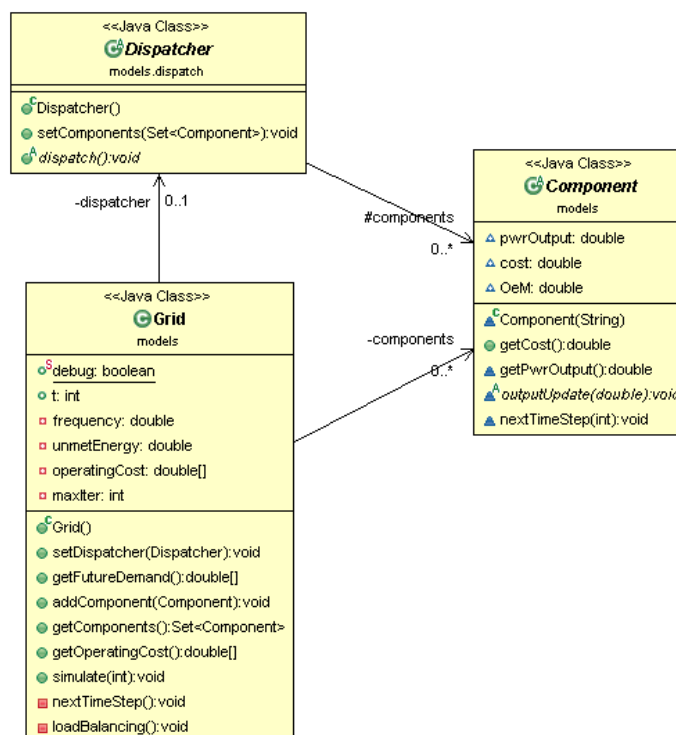


Figura 23 - Diagrama de Classes (associação entre objeto Grid e objetos Dispatcher e Component)

Função loadBalancing()

A busca pela frequência foi implementada utilizando um algoritmo numérico iterativo. Neste método, a frequência é alterada para cima ou para baixo através de incrementos definidos proporcionalmente ao desbalanço de potência atual (para acelerar a convergência do sistema).

No momento em que o balanço de potência muda de sinal, isto é, o algoritmo passa pelo valor desejado, o incremento é reduzido por um fator (no caso igual a 1.5) de modo que os passos sejam menores, visando chegar cada vez mais perto da solução. Isto se repete até que a frequência atinja os limites máximo ou mínimo (na qual determina-se que houve um problema de excesso/falta de energia) ou até que o balanço energético seja satisfeito.

```

while (true) {

    //Net load calculation
    for (Component component : components) {
        component.outputUpdate(frequency);
        powersum += component.getPwrOutput();
    }

    //Verify power balance
    if (Math.abs(powersum) < 0.0001) { break; }

    sumB = sumA;
    sumA = powersum;

    //Update frequency
    if (Math.signum(sumB) != Math.signum(sumA)) coef /= 1.5;
    inc = coef*powersum;

    //Update frequency
    frequency += inc;

    j++;

    //No solution (max iterations reached)
    if (frequency > 65 || frequency < 55) {
        unmetEnergy += powersum;
        break;
    }
}
}

```

Figura 24 - Implementação da busca da frequência de balanço entre geração e demanda

6.2.3: Estratégias de despacho das fontes (objetos Dispatcher)

Os algoritmos de despacho das fontes (load-following, carregamento cíclico e despacho ótimo) não são programados como métodos na classe grid. Em vez disso, é utilizado um padrão conhecido como **Strategy Pattern**, na qual se cria uma interface com todos os métodos que um algoritmo de despacho deve fornecer e, a partir desta interface, criam-se classes de implementação com as características específicas de cada algoritmo de despacho.

Desta maneira, encapsulam-se as funcionalidades de despacho em classes próprias e torna-se possível e fácil alternar entre estratégias

elegantemente, mesmo em tempo de execução do código, além de garantir melhor manutenção do código resultante.

Esta relação pode ser vista na Figura 23, e a relação entre a interface Dispatcher e suas respectivas implementações pode ser vista na Figura 25.

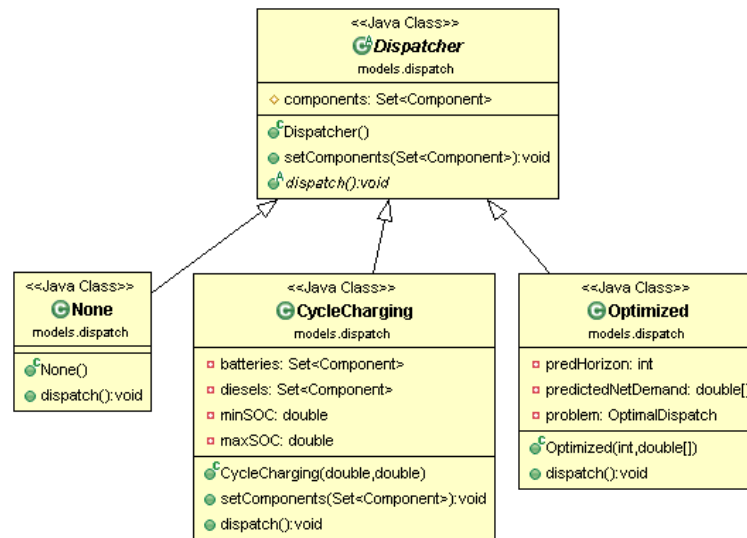


Figura 25 - Implementações de estratégias de despacho

6.2.3.1: Despacho por otimização

Para implementar o problema de otimização, são necessários dois itens:

- Um solver capaz de resolver problemas do tipo escolhido;
- Descrição do problema na linguagem de programação alvo, utilizando bibliotecas e funções disponibilizadas pelo solver escolhido.

O primeiro aspecto chave é o solver utilizado. Resultados preliminares foram obtidos pelo LabPlan utilizando o solver proprietário Gurobi, que figura entre os melhores solvers comerciais existentes. No entanto, como o valor de sua licença é proibitivo para o projeto, optou-se por testar solvers código-aberto tais como o **GLPK** (GNU Linear Programming Kit) e o **Ip_solve**.

A outra questão importante são as diferentes formas de programação dos problemas que os solvers têm. Para a linguagem Java, diferentes solvers possuem diferentes formas de se especificar o problema de otimização. O

GLPK, por exemplo, tem um conjunto de funções diferentes daquele da suíte lp_solve. Isto caracterizaria um problema caso necessitássemos testar diferentes solvers para um mesmo problema de otimização, já que seria necessário reescrever todo o problema de outra forma.

Felizmente, encontrou-se uma solução elegante para este problema: a ferramenta Ateji **OptimJ**.

6.2.3.1.1: OptimJ

O OptimJ consiste numa extensão da linguagem de programação Java que incorpora elementos que facilitam a programação de problemas de otimização e, portanto, podendo ser integrado à códigos Java já existentes sem nenhum esforço adicional.

A principal vantagem do OptimJ é, além de usar orientação a objetos para definição do problema, poder expressar estes tipos de problemas numa linguagem de alto nível que independe do solver utilizado. Desta forma, pode-se testar a resolução de problemas em diferentes solvers sem alterar o código relacionado ao problema de otimização em si. O OptimJ suporta famosos solvers existentes como o Gurobi, GLPK e lp_solve. Além disso, existe um plugin para a plataforma de desenvolvimento Eclipse, tornando realmente fácil e prático o desenvolvimento do código.

O OptimJ e sua linguagem de programação foram utilizados para implementação no simulador com resultados amplamente satisfatórios.

Dentre as vantagens principais está o fato de, ao termos uma plataforma integrada entre a linguagem de programação do simulador e a linguagem de otimização, podemos aproveitar as mesmas estruturas de informação (classes e objetos) criadas pelo simulador para realizar o setup e declaração de todas as variáveis de otimização e restrições do problema de otimização alvo.

```

package examples;

public model DietModel extends DietModelParams solver cplex {

    public DietModel (
        String[] VTMN, // name of the vitamin i
        String[] FOOD, // name of the food i
        double[String] cost, // cost of the food i
        float[String] f_min, // minimum amount of food i desired per day
        float[String] f_max, // maximum amount of food i desired
        float[String] n_min, // minimum amount of vitamins i required
        float[String] n_max, // maximum amount of vitamins i required
        float[String][String] amt)// amount of nutriment j in food i

        // decision variables
        final var double[String] Buy[String j : FOOD] in f_min[j] .. f_max[j];

        // objective function
        minimize sum {String j : FOOD} { cost[j] * Buy[j] };

        // constraints
        constraints {
            forall(String i : VTMN) {
                n_min[i] <= sum {String j : FOOD} { amt[i][j] * Buy[j] };
                sum {String j : FOOD} { amt[i][j] * Buy[j] } <= n_max[i];
            }
        }
    }
}

```

Figura 26 - Exemplo de modelagem de problema de otimização com OptimJ

Na prática, isto se traduziu pela não necessidade de se reescrever o problema de otimização caso o número/tipo de componentes da simulação da microrrede fosse alterado. Isto pode ser visualizado como exemplo na Figura 27, onde a restrição de balanço de potência é feita para todos os objetos ‘*Component*’ presentes na variável ‘*comp*’, que consiste em um conjunto *Set*.

```

Constraints {

forall(int k : steps) {

// Power balance
sum{Component comp : dispatchComponents}{ pow[comp][k] } == netDemand[k];

}

}

```

Figura 27 - Exemplo de restrições utilizando OptimJ

Na Figura 28 podemos visualizar a programação do problema de otimização que foi definido na seção 5.3.7:.

```
constraints
{
    forall(int k : steps) {
        // Power balance
        sum{Component comp : dispatchComponents}{ pow[comp][k] } ==
netDemand[k];

        //Battery SOC
        forall(Component bat : batteries) {
            if (k==0) {
                Eb[bat][k] == ((Battery) bat).getEb();
            }
            if (k>0) {
                Eb[bat][k] == Eb[bat][k-1]-pow[bat][k-1];
            }
        }
    }
}

minimize sum{int k : steps, Component gen : diesels}{ pow[gen][k] };
```

Figura 28 - Formulação do problema de otimização

6.3: Execução do simulador

O simulador foi projetado para que a configuração de simulação seja fácil e transparente, sem necessidade de modificar-se qualquer detalhe de implementação. No momento atual ainda não foram desenvolvidas interfaces de usuário, seja por linha de comando ou interfaces gráficas, embora a criação das mesmas seja planejada para o futuro. Desta forma a simulação deve ser configurada a partir da fonte e executada.

Na Figura 29, pode-se ver um exemplo de como definir uma simulação utilizando o simulador. De uma forma geral, especificam-se os arquivos de entrada e criam-se os componentes presentes na microrredes, com as configurações desejadas. Os componentes que correspondem às fontes renováveis e cargas utilizam os dados carregados dos arquivos de entrada. Por último, define-se a estratégia de despacho desejada para operação e se executa a simulação. Os parâmetros de configuração dos componentes específicos (construtores) não serão detalhados aqui.

```

Dispatchable.freqRef = 60;

//Arquivos de entrada

double[] dataload = Logger.readFile("load_43_automob",-30,0, 0);
double[] datawind = Logger.readFile("wind",1,0, 0);
double[] datasolar = Logger.readFile("solar",1,0, 5);

//Definição das cargas

grid.addComponent(new Load("Load", dataload));

//Definição das fontes renováveis

grid.addComponent(new WindTurbine("WindTurbine1", datawind));
grid.addComponent(new PhotovoltaicPanel("PV1",50,datasolar)); //7.5kW aprox.

//Definição das fontes despacháveis

grid.addComponent(new
Battery("Battery1",CellType.LITHIUM,96,2,0,Mode.ISOCHRONOUS));
grid.addComponent(new GenericDispatchable("Microturbine1",17,0,Mode.DROOP));

//Definição da estratégia de despacho das fontes

grid.setDispatcher(new Optimized(24, grid.getFutureDemand()));
grid.setDispatcher(new CycleCharging(40,70));

//Comandos para execução da simulação

grid.simulate(dataload.length-1);
runViewer();
showCost();

```

Figura 29 - Exemplo de definição de simulação

Capítulo 7: **Gerenciador Energético e Sistema de Comunicação**

7.1: Comunicação da Microrrede

Dentro da microrrede, a comunicação é parte chave, uma vez que será através dela que será coordenada a operação de todas as fontes e cargas da rede de acordo com as decisões do Controlador Central.

Na decisão dos protocolos de comunicação a serem utilizados, algumas propostas foram estudadas. Existem padrões hoje mais avançados para interoperabilidade entre dispositivos do sistema elétrico como o DNP3 e IEC61850, ao mesmo tempo em que protocolos seriais mais antigos como o Modbus/RTU ainda se fazem presentes.

Dado que o projeto conta com recursos humanos e de tempo escassos, um dos requisitos fundamentais é que as soluções sejam plausíveis de serem implementadas de acordo com o cronograma do projeto, sem complicações demasiadas que pudessem atrapalhar o desenvolvimento do mesmo, mas ao mesmo tempo viabilizando funções de leitura e escrita entre os dispositivos da microrrede.

Nesse cenário, o protocolo principal escolhido foi o Modbus. Tal protocolo possui algumas vantagens que o tornam conveniente para este projeto:

- Protocolo maduro, amplamente utilizado;
- Disponibilidade de equipamentos de prateleira interoperáveis através do mesmo (Schneider-Electric);
- Simples, diversas implementações abertas existentes em linguagens variadas;

A preferência foi dada à variante Modbus/TCP, na qual a camada de aplicação Modbus se encontra através da pilha TCP/IP, permitindo

comunicações mais simples através do padrão ethernet, cabos de rede RJ45 e switches.

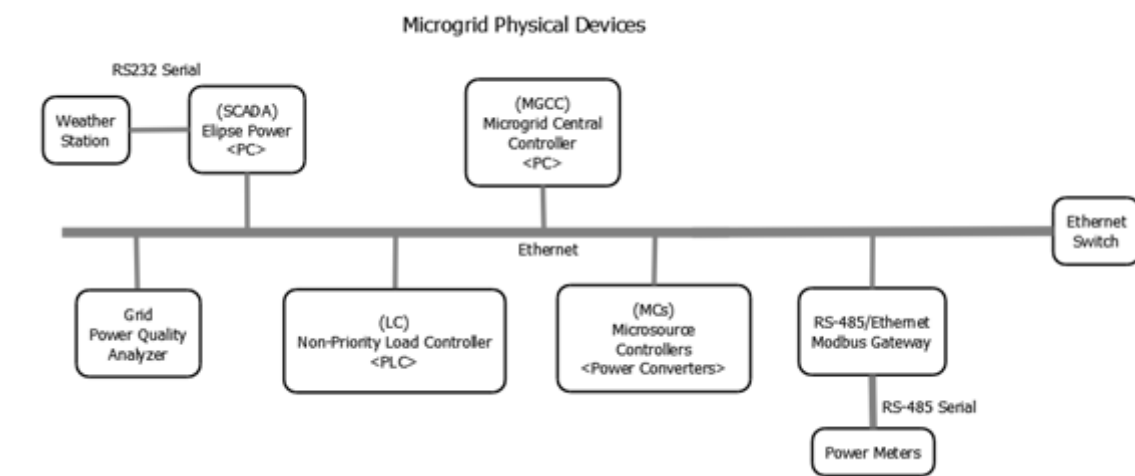


Figura 30 - Esquema de comunicação da microrrede

7.1.1: O Protocolo Modbus

O modbus é um protocolo originalmente serial publicado pela Modicon (atual Schneider-Electric) em 1979. Simples e robusto, se tornou um protocolo de comunicação padrão de facto em dispositivos industriais, operando de acordo com o modelo cliente/servidor.

A versão modbus TCP, de uma forma geral, encapsula a mensagem em um pacote TCP, de modo que este protocolo de aplicação possa ser utilizado sobre pilhas Ethernet.

Os dispositivos modbus operam sobre registradores de memória para configurar, monitorar e controlar o dispositivo, de modo que os servidores (escravos) modbus geralmente contêm o que é chamado de **Mapa de Registradores/Memória**, que são endereços lógicos que contem algum tipo de informação (Figura 31).

Eles são divididos em dados 'Coils' (saídas binárias), 'Discrete Inputs' (entradas binárias), 'Input Registers' (dados 16-bit de entrada) e 'Holding Registers' (dados 16-bit de saída).

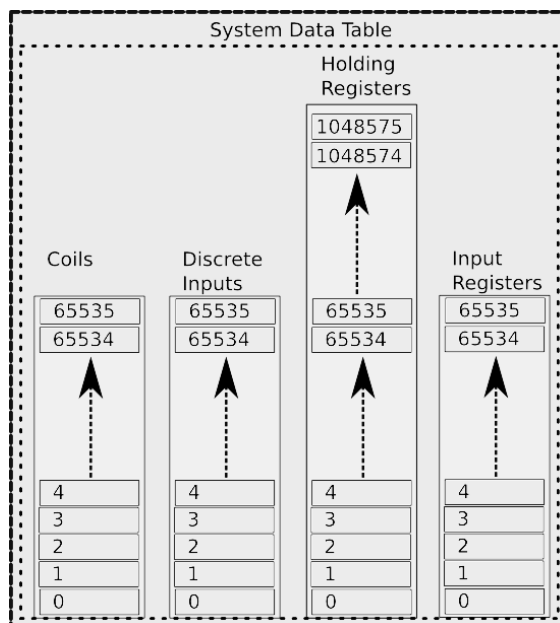


Figura 31 - Mapa de memória modbus

Tais dispositivos servidores recebem requisições dos clientes que contém um chamado **Código de função**, que pode ser tanto de leitura de um determinado endereço do mapa de memória, quanto de escritura do mesmo.

Tabela 4 - Códigos de função modbus

Código	Função
01 (01H)	Read Coil (Output) Status
03 (03H)	Read Holding Registers
04 (04H)	Read Input Registers
05 (05H)	Force Single Coil (Output)
06 (06H)	Preset Single Register
15 (0FH)	Force Multiple Coils (Outputs)
16 (10H)	Preset Multiple Registers
17 (11H)	Report Slave ID Hidden

Nos dispositivos modbus da microrredes, a comunicação será realizada por meio de requisições sobre o mapa de memória dos equipamentos – haverá mapas de memória em todos os equipamentos modbus, incluindo no próprio controlador central da microrrede. Nos mapas de memória estarão os dados desejados – nos medidores, os valores de leitura das grandezas elétricas. Nos conversores das fontes, valores de geração para as fontes. Entre outros.

7.2: Implementação do Controlador Central

Ao analisarmos o funcionamento do simulador, veremos que parte da sua implementação corresponde à modelagem do funcionamento dos equipamentos da microrrede, enquanto outra parte do simulador corresponde à **programação de estratégias de operação e controle do despacho** destas mesmas fontes que foram modeladas.

Não é difícil observar que boa parte do código de simulação corresponde à implementação de funções que pertencem ao próprio controlador central da microrrede (MGCC).

De fato, a escolha da linguagem Java para implementação do simulador e do controlador não foi feita ao acaso. Utilizando-se do paradigma de orientação a objetos e do padrão de encapsulamento, temos fronteiras e interfaces bem definidas entre os componentes da simulação de forma que podemos isolar facilmente a parte correspondente aos algoritmos de controle.

Desta maneira, podemos implantar o código do simulador (que implementa as estratégias de despacho) sem modificações para o hardware que comporta o controlador central, bastando somente alterar a implementação das classes dos componentes de simulação, utilizando funções de comunicação Modbus para atribuir os set-points desejados de geração nos dispositivos físicos ou alterar alguma outra característica (como modo de operação, entre outros).

Para as funções de comunicação Modbus em Java, uma implementação já existente chamada **jamod** foi utilizada, que utiliza a implementação de sockets Java para a abertura de conexões TCP/IP.

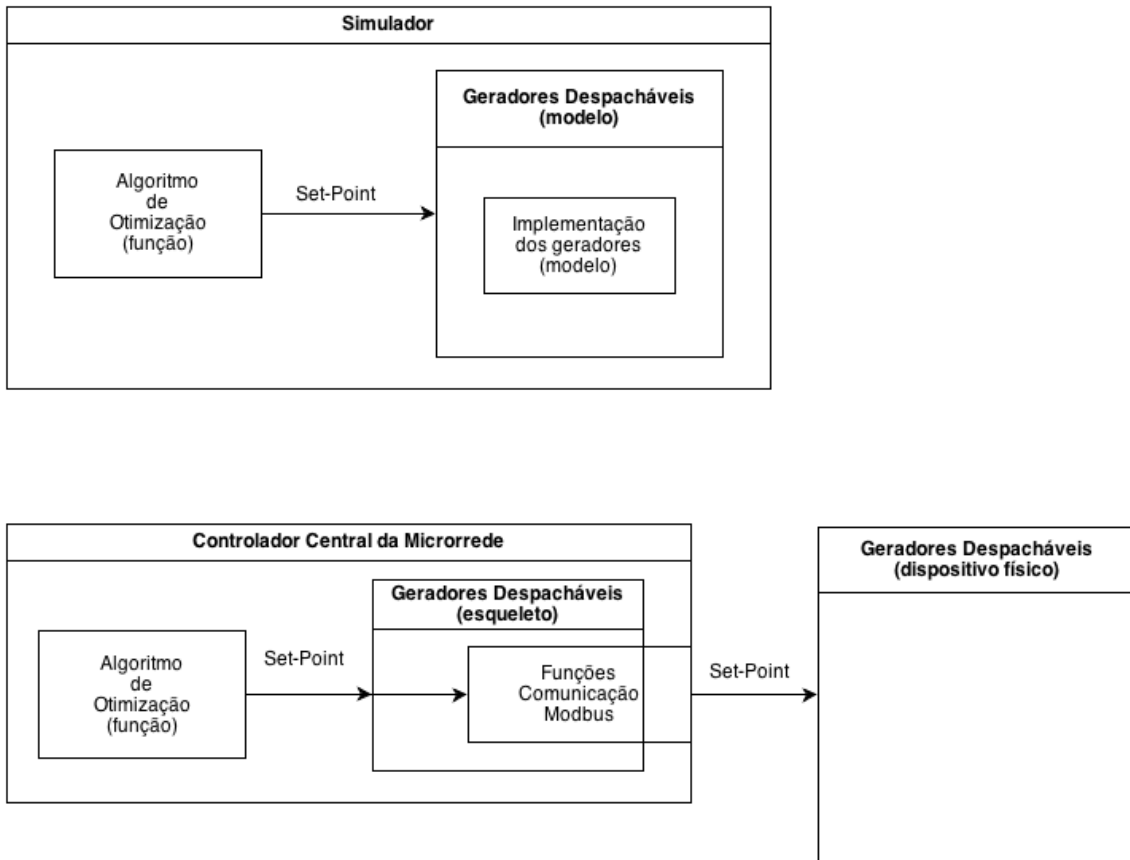


Figura 32 - Reaproveitamento de funções de gerenciamento energético entre simulador e controlador central. Simulação (acima) e controlador central propriamente dito (abaixo)

7.3: Testes de comunicação

Testes de comunicação entre a implementação Java utilizando jamod do controlador central e dispositivos modbus em rede foram realizados com sucesso, validando as operações de leitura e escrita nos mesmos.

Foram utilizados tanto softwares simuladores modbus, que rodam em sistemas operacionais de PCs, quanto com os dispositivos medidores que serão utilizados na microrredes, tal qual o mostrado na Figura 33. Importante notar que estes medidores só se comunicam através de barramento serial RS-485. Desta forma, um gateway especial modbus/TCP da mesma fabricante (Figura 34) foi utilizado para servir de interface entre estes conversores e os

outros dispositivos modbus/TCP da rede, como pode ser visto no esquema mostrado anteriormente na Figura 30.



Figura 33 - Medidor de grandezas elétricas modbus PM3255 - Schneider-Electric



Figura 34 - Gateway Modbus/RTU (RS-485) para Modbus/TCP (Ethernet)

Capítulo 8: Resultados

8.1: Exibição dos resultados

Ao lançar a simulação, os cálculos são rapidamente realizados e salvos em um arquivo de log em diversos possíveis formatos, entre eles o csv. As variáveis disponíveis para visualização resultantes da simulação aparecem no momento da abertura automática do programa Simview (Figura 35), responsável por manipulação de dados e gráficos que foi utilizado para a visualização dos resultados da simulação da microrrede. Além da visualização dos resultados no Simview, o resultado do cálculo de desgaste da bateria é mostrado no terminal de saída do programa, juntamente com os custos de cada gerador ao final do período de simulação (Figura 36).

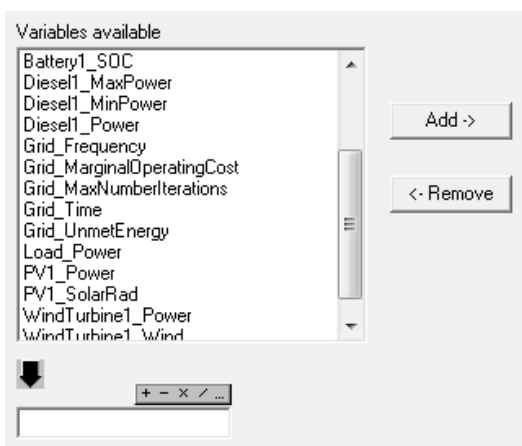


Figura 35 - Variáveis disponíveis (Simview)

```
Simulating...
10.0%
20.0%
30.0%
40.0%
50.0%
60.0%
70.0%
80.0%
90.0%
100.0%
-----
Load cost: 0,00
WindTurbine1 cost: 0,00
PV1 cost: 0,00
Battery1 cost: 876,00
Battery1 wear: 110,71%
Diesel1 cost: 25821,38
-----
Total operating cost: 26697,38
-----
Opening SimView...
```

Figura 36 - Desgaste da bateria e custos da microrrede

A seguir, serão mostrados alguns resultados obtidos no simulador para diferentes estratégias de despacho da microrrede. Poderemos então observar o comportamento do sistema e o comportamento das fontes no decorrer da operação.

8.2: Dados de entrada

Como previamente explicado nos capítulos anteriores, dados como perfis de demanda, velocidade do vento e radiação solar são utilizados no simulador através de arquivos com dados, que são lidos no momento da simulação. Os dados utilizados para as simulações demonstradas a seguir serão detalhados.

8.2.1: Perfil de Carga

O perfil de carga utilizado pode ser visto na Figura 37. Este perfil corresponde à utilização de energia elétrica de um consumidor industrial automotivo típico e o padrão exibido corresponde à utilização semanal de energia do mesmo.

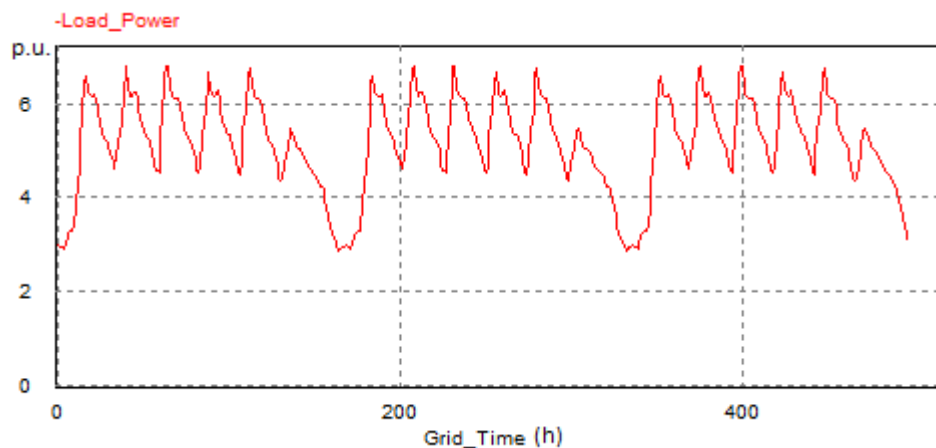


Figura 37 - Perfil de demanda

8.2.2: Perfis de geração renovável

Os dados de radiação solar e velocidade do vento utilizados nestas simulações foram obtidos através do software Homer Energy⁴, correspondendo à localidade de Betim-MG⁵, com as coordenadas de latitude e longitude: 19° 58' S 44° 11' W:

⁴ Mais informações podem ser obtidas na página homerenergy.com

⁵ Corresponde a localidade mais próxima de Florianópolis possível de ser obtida no software Homer Energy.

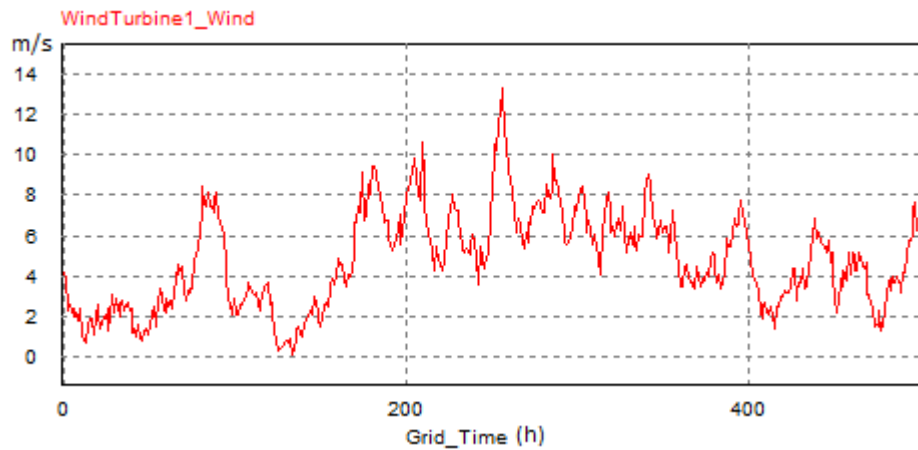


Figura 38 - Velocidade do vento

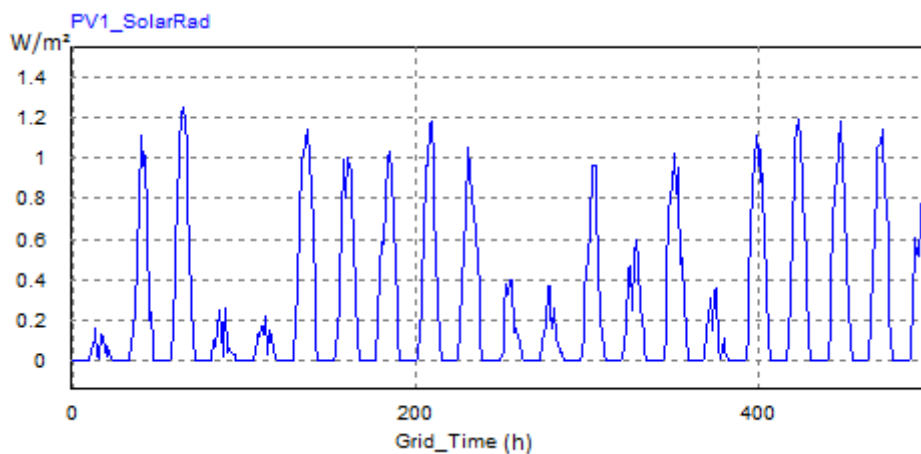


Figura 39 - Radiação solar

Podemos observar que a velocidade do vento não exibe um padrão definido, enquanto que a radiação solar é afetada por condições de nebulosidade.

8.3: Estratégia de Carregamento Cíclico

A estratégia de carregamento cíclico foi simulada para um sistema composto por um banco de baterias (Battery1), uma microturbina a gás (Microturbine1), um conjunto de painéis fotovoltaicos (PV1) e uma turbina eólica (WindTurbine1) de pequeno porte (Figura 40).

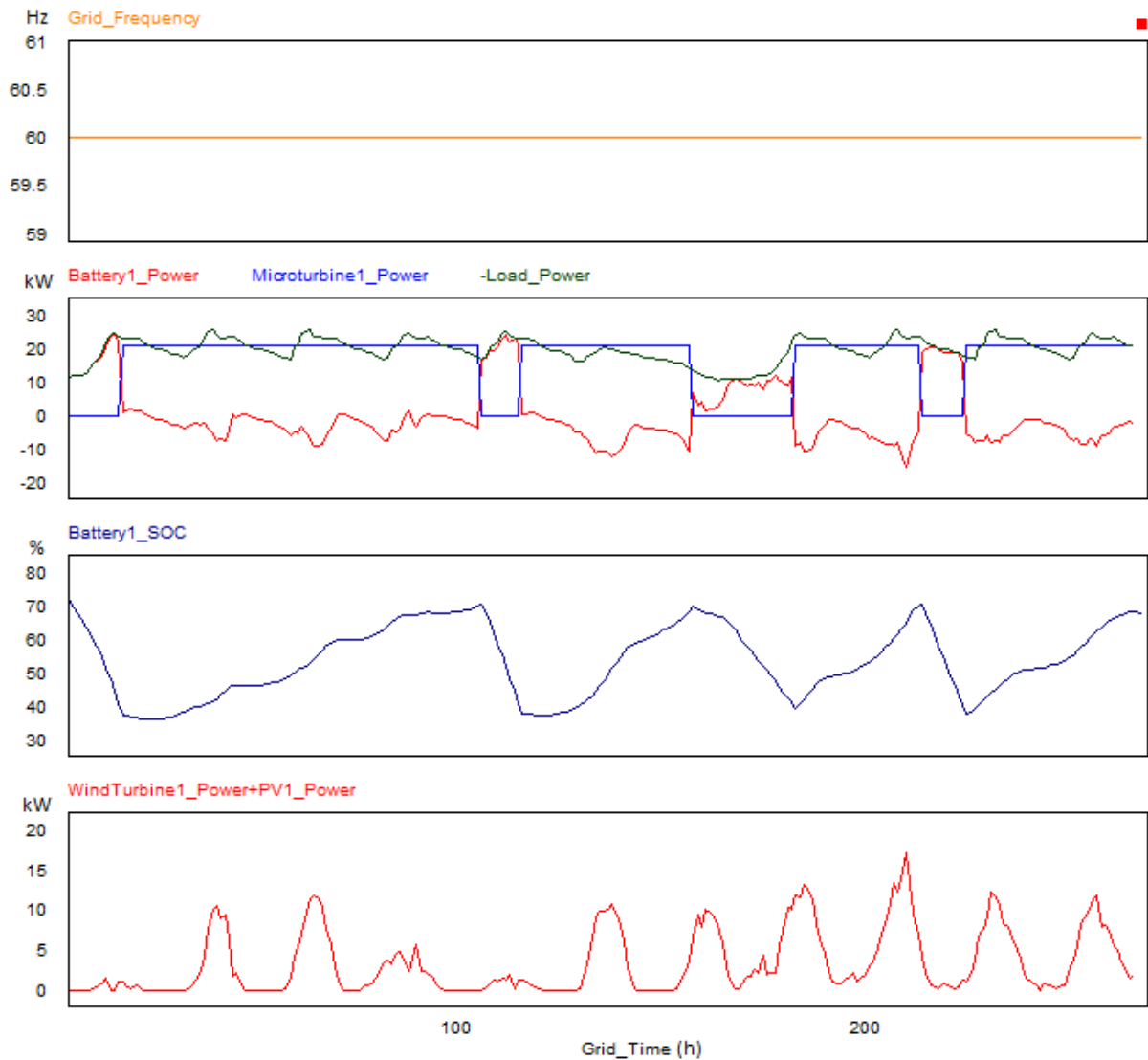


Figura 40 - resultado carregamento cíclico

Neste caso de simulação, a microturbina é acionada na sua potência máxima assim que a carga da bateria (SOC) chega aos 40%. O gerador é então desligado assim que a bateria chega aos 70%, de modo que exista uma margem na bateria para absorção de eventuais sobras decorrentes de grande geração renovável, o que de fato acontece nos momentos de aumento da carga da bateria sem a utilização a microturbina a gás.

A frequência da rede se mantém em 60 Hz devido ao fato de não haver nenhum gerador operando em modo droop. O banco de baterias opera no modo isócrono e regula a frequência no valor nominal, desde que tenha capacidade para tal – caso deste exemplo de simulação, já que quando sua carga chega a valores críticos os geradores despacháveis são acionados.

```

grid.addComponent(new Load("Load", dataLoad));

grid.addComponent(new WindTurbine("WindTurbine1", dataWind));
grid.addComponent(new PhotovoltaicPanel("PV1", 50, dataSolar));

grid.addComponent(new
Battery("Battery1", CellType.LITHIUM, 96, 100, 0, Mode.ISOCHRONOUS));

grid.addComponent(new
GenericDispatchable("Microturbine1", 21, 0, Mode.CONST_POWER));

grid.setDispatcher(new CycleCharging(40, 70));

```

Figura 41 - Código do exemplo de carregamento cíclico

O benefício desta estratégia é um melhor aproveitamento do combustível das fontes despacháveis em detrimento da vida útil da bateria, que é submetida a uma maior quantidade de ciclos de carga e descarga.

8.4: Estratégia de Load-following

8.4.1: Duas fontes despacháveis (microturbina)

Na Figura 43 tem-se um exemplo de gráficos dos resultados da simulação exibidos no Simview. Tal simulação corresponde ao sistema definido pelo exemplo de código mostrado na Figura 42, com a estratégia de *load-following* das fontes por meio de *droop*. Neste exemplo, duas fontes com capacidades diferentes (10kW e 20kW) operam dividindo a carga de acordo com sua capacidade máxima. Importante notar a ausência de uma estratégia de despacho (função `setDispatcher`), pois neste caso as fontes operam autonomamente somente de acordo com o *droop*.


```

grid.addComponent(new Load("Load", dataLoad));

grid.addComponent(new WindTurbine("WindTurbine1", dataWind));
grid.addComponent(new PhotovoltaicPanel("PV1", 50, dataSolar));

grid.addComponent(new GenericDispatchable("Microturbine1", 10, 0, Mode.DROOP));
grid.addComponent(new GenericDispatchable("Microturbine2", 20, 0, Mode.DROOP));

```

Figura 42 - Código para exemplo de divisão de carga por droop

Podemos observar que o sistema se comporta como esperado, no qual os desvios na frequência do sistema acabam coordenando a divisão da potência consumida entre as fontes. Nesse caso, a segunda fonte (Microturbine2) acaba por absorver uma maior parte da carga devido a sua maior capacidade, o que traz maiores custos devido a maior utilização de combustível por parte dela.

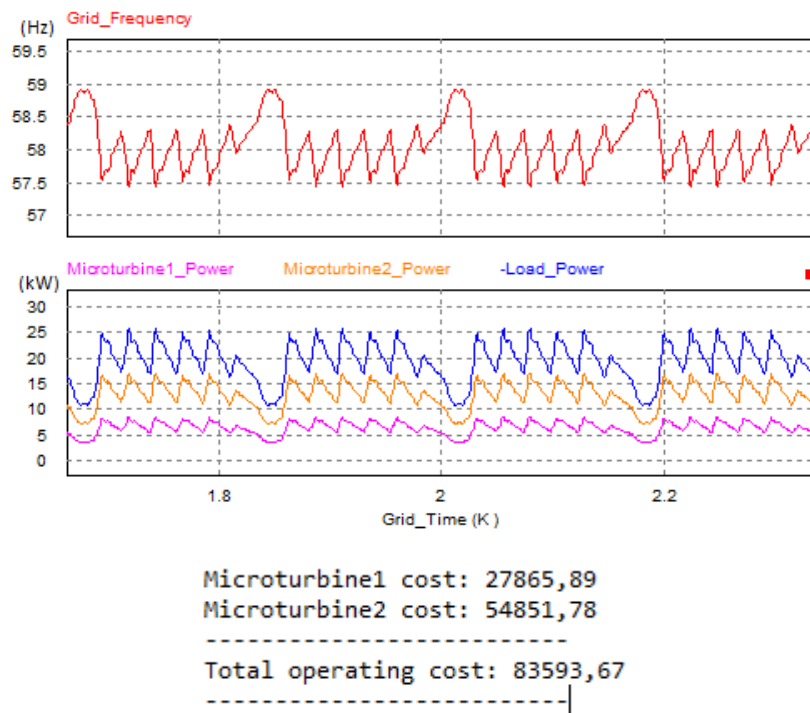


Figura 43 - Resultados Load-following - Grid_Time: passos de simulação de 1 hora (K)

8.4.2: Bateria como gerador isócrono

Neste caso, foi simulado um sistema com uma bateria e uma microturbina despachável, na qual a bateria atua como gerador isócrono (Figura 44), além de um conjunto de painéis fotovoltaicos (PV1) e uma pequena turbina eólica (WindTurbine1).

Podemos ver que, uma vez que temos a bateria controlando a frequência, ela é a primeira fonte a buscar o atendimento da demanda. Sua carga (SOC – State of Charge) depende do excesso de energia renovável em relação à carga. Enquanto existe carga suficiente, a frequência se mantém na casa dos 60Hz.

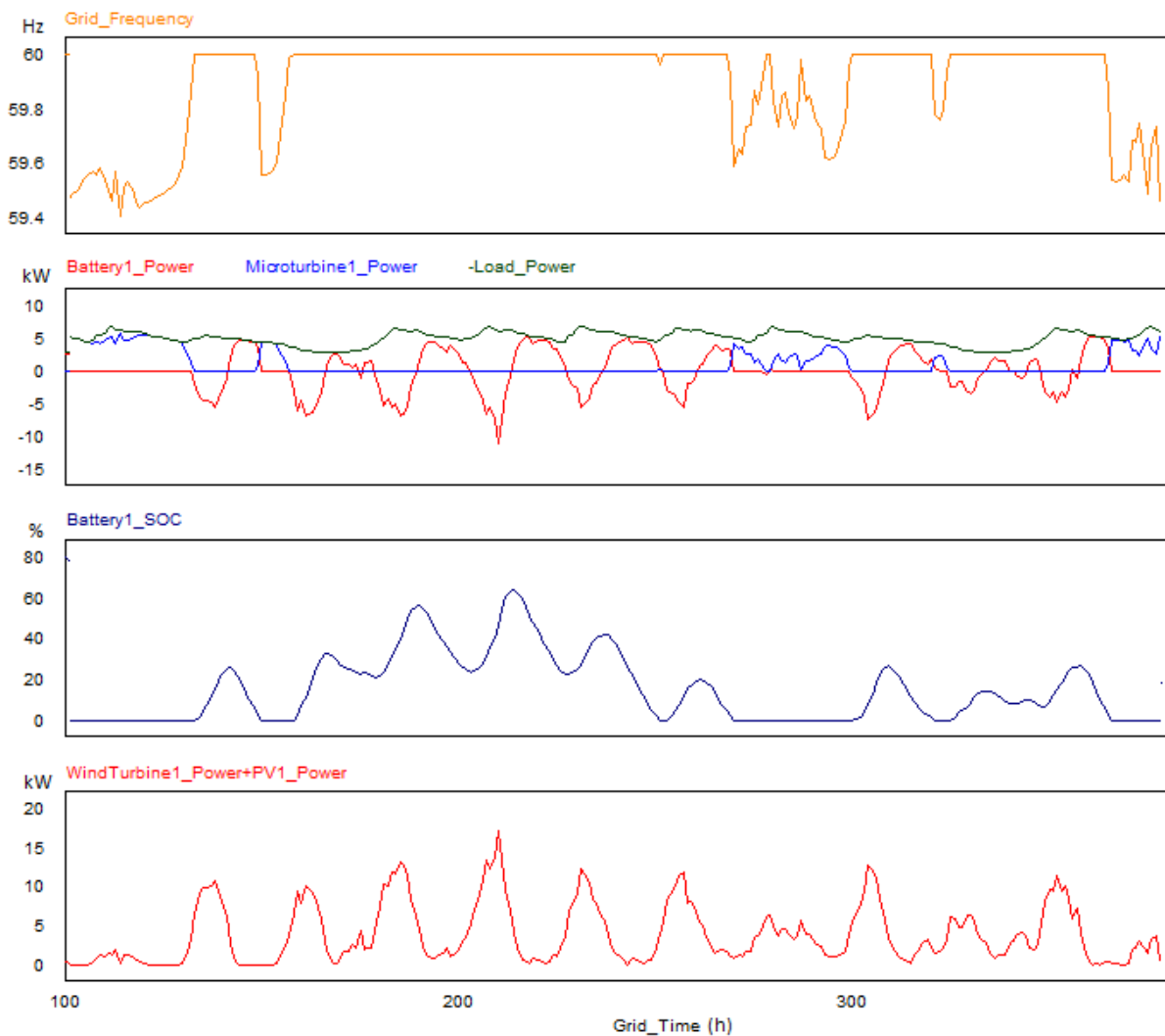


Figura 44 – Bateria como gerador isócrono

No momento em que a bateria acaba descarregada, a frequência cai e o Diesel começa a gerar energia para o atendimento da demanda. Vemos claramente que um aumento da demanda ocasiona uma redução na frequência, que faz com que o gerador Diesel aumente seu nível de geração.

Podemos perceber que existem diversos momentos nos quais a bateria descarrega-se por completo e opera-se apenas com a microturbina. De fato, visualizando o comportamento podemos verificar que, para termos um bom desempenho, o ideal é contar com geração renovável suficientemente grande para que essa energia gerada seja armazenada para utilização superior. Portanto, o dimensionamento de um sistema elétrico desse tipo deve levar em consideração os três fatores ao mesmo tempo: Demanda, capacidade de geração renovável e capacidade da bateria.

Podem ocorrer momentos nos quais existe um excesso de energia e a bateria, por estar plenamente carregada, não é capaz de absorver. Nestes casos de excesso de geração, a frequência subiria indefinidamente. Futuramente modos de limitação de potência das fontes renováveis deverão ser implementados para evitar situações como esta.

8.5: Despacho ótimo baseado em previsão

O mesmo sistema do caso anterior (8.4.2:) foi simulado utilizando a estratégia de despacho baseada em algoritmo de otimização baseado em previsão. Como podemos reparar na Figura 45, a mudança foi a utilização de objeto 'dispatcher' do tipo 'Optimized', onde 24 corresponde ao horizonte de previsão (em horas) e a previsão de demanda e geração renováveis foram consideradas como perfeitas, isto é, o gerenciador tem dados exatos da quantidade de demanda líquida necessária para ser suprida pelas fontes despacháveis durante as próximas 24 horas do instante de cálculo.

Os resultados são exibidos na Figura 46. Primeiramente se observa que a frequência fica regulada no valor nominal de 60 Hz, o que acontece devido ao fato de, com previsão perfeita, os valores de geração calculados para a microturbina compensarem exatamente a demanda necessária, dessa forma não havendo

quaisquer déficit ou superávit de geração que faria com que a frequência caísse ou subisse, respectivamente.

```

grid.addComponent(new Load("Load", dataload));

grid.addComponent(new WindTurbine("WindTurbine1", datawind));
grid.addComponent(new PhotovoltaicPanel("PV1", 50, datasolar));

grid.addComponent(new
Battery("Battery1", CellType.LITHIUM, 96, 20, 0, Mode.ISOCHRONOUS)); //92.5Ah
grid.addComponent(new GenericDispatchable("Microturbine1", 30, 0, Mode.DROOP));

grid.setDispatcher(new Optimized(24, grid.getFutureDemand()));

```

Figura 45 - Código de execução para despacho ótimo com previsão

Além disso, observa-se uma dinâmica diferente de utilização da bateria, na qual ela não exibe nem o comportamento cíclico da estratégia de carregamento cíclico vista anteriormente, nem o esgotamento completo recorrente da estratégia na de controle apenas por droop com a bateria como fonte isócrona. Essa utilização diferenciada da bateria é resultado do objetivo de menor utilização da microturbina.

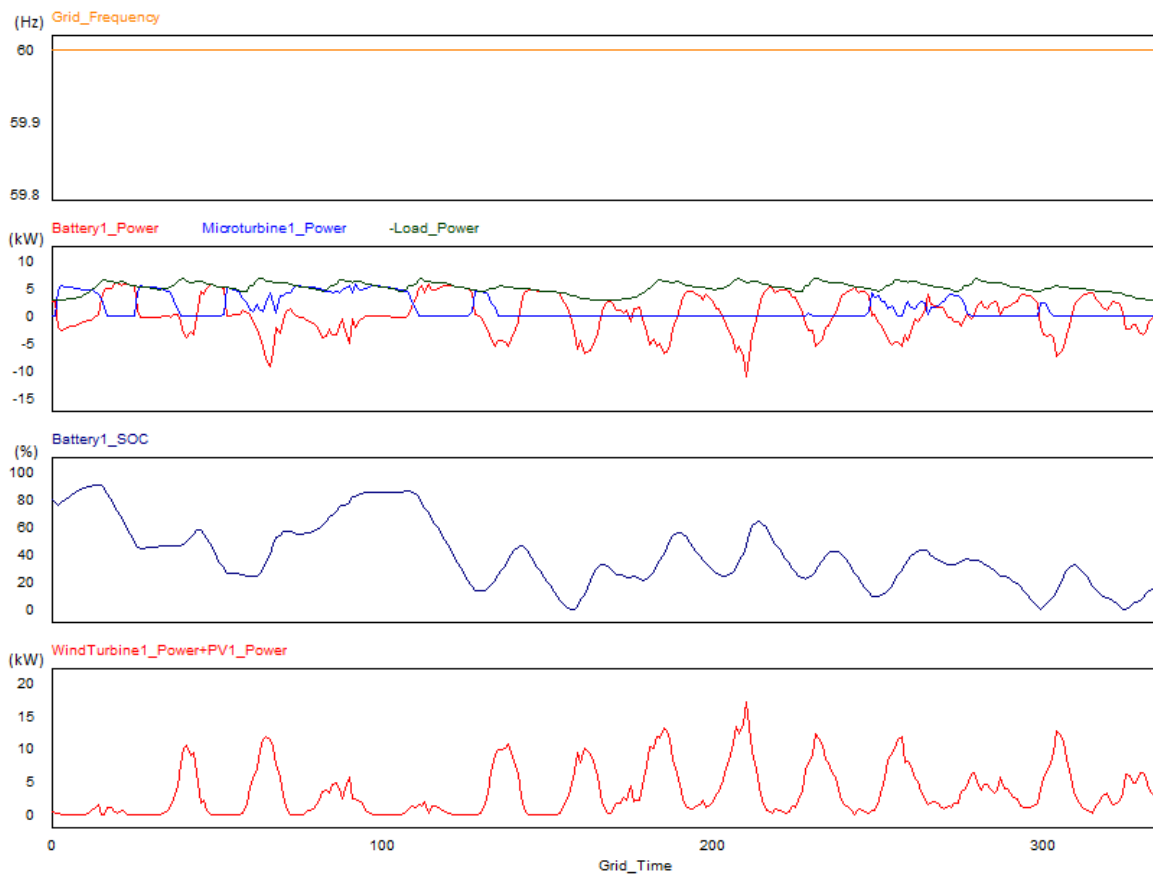


Figura 46 - Resultados para despacho ótimo com previsão

Capítulo 9: **Conclusões e Perspectivas**

Neste trabalho foi realizada um profundo estudo sobre as necessidades técnicas envolvidas na operação de uma microrrede e das possíveis soluções para as mesmas, o que culminou no desenvolvimento de uma ferramenta extremamente útil de simulação (com modelos adequados dos dispositivos) e de uma implementação preliminar do dispositivo que realizará efetivamente as funções de despacho energético na microrrede real.

Foi visto que a implementação deste simulador foi amplamente satisfatória ao implementar os diversos tipos de estratégia de despacho consideradas (controle descentralizado por droops, carregamento cíclico e despacho ótimo baseado em previsão), fornecendo aos parceiros do projeto uma ferramenta flexível, tanto para a visualização do comportamento para melhor compreensão da operação das fontes na microrrede, quanto plataforma de base para eventuais melhorias e proposições de diferentes estratégias de despacho. Embora os resultados obtidos estejam ainda em fase preliminar, prevê-se que as análises obtidas através do mesmo sirvam de base para justificativas econômicas e técnicas sobre a viabilidade de implantação de microrredes no sistema elétrico.

A presença do simulador permitirá estudar e explorar diversas estratégias de controle da microrrede. Para tal, uma evolução natural desta ferramenta é incorporar as possibilidades e resposta de demanda, na qual consumidores dispostos a desligar algumas de suas cargas podem efetivamente se comportar como geradores virtuais, podendo ser modelados de forma semelhante às fontes despacháveis deste trabalho. Além disso, é prevista também a modelagem de diversos tipos de dispositivos, como diferentes tipos de fontes (tipos de baterias, painéis e turbinas eólicas, cogeração, etc.), bem como a modelagem da coordenação de fontes no barramento de corrente contínua, utilizando controle droop, de modo a tornar a ferramenta ainda mais flexível para a simulação de microrredes.

Futuramente, este simulador estático com as implementações das estratégias de despacho pode ser aproveitado em algum tipo de simulador que tenha também a funcionalidade de modelar fenômenos elétricos de mais baixo nível e de dinâmicas

mais rápidas, de modo a observar o comportamento elétrico dos conversores e a estabilidade da rede com o controle droop.

Finalmente, outra etapa importante a seguir consiste em estudar, com a ajuda do simulador, qual seria a melhor configuração de despacho dentre todas as possibilidades disponíveis para a microrrede.

Bibliografia:

- [1] “Blog EngenheirOnline,” 29 12 2012. [Online]. Available: <http://engenheironline.wordpress.com/2012/12/29/brasil-expectativas-da-matriz-energetica-para-2013-e-sua-evolucao-ate-2020/>. [Acesso em 2013 07 2013].
- [2] “Blog PetroleiroAnistiado,” 06 06 2013. [Online]. Available: <http://petroleiroanistiado.wordpress.com/2013/06/06/energia-eolica-futura-participacao-na-matriz-energetica-brasileira/>. [Acesso em 2013 07 25].
- [3] Kristopher Settle, “theenergycollective,” 6 3 2013. [Online]. Available: <http://theenergycollective.com/ecskris/195221/energy-s-latest-buzzword-microgrid>. [Acesso em 25 07 2013].
- [4] Richard Martin, “Navigant Research,” 1 04 2013. [Online]. Available: <http://www.navigantresearch.com/newsroom/worldwide-microgrid-market-will-surpass-40-billion-in-annual-revenue-by-2020>. [Acesso em 25 07 2013].
- [5] R. Adapa, F. L. Alvarado, B. K. Johnson e R. H. Lasseter, “Expandable multiterminal DC systems based on voltage droop,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, n. 4, pp. 1926 - 1932, 1993.
- [6] J. F. Manwell, “HYBRID2- A Hybrid System Simulation Model - Theory Manual,” National Renewable Energy Laboratory, 1997. [Online]. Available: http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/Hy2_theory_manual.pdf.
- [7] J. F. Manwell, “Improvements to the Hybrid2 Battery Model,” 2005. [Online]. Available: <http://www.ceere.org/rerl/publications/published/2005/AWEA05BatteryModel.pdf>.
- [8] J. F. Manwell, “KiBaM Battery model,” [Online]. Available: <http://www.ceere.org/rerl/projects/software/batteryModel.html>.
- [9] A. SECIL, “Fatigue life calculation by rainflow counting method,” 2004.

Anexo I

