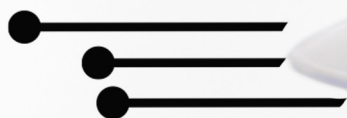




**Luís Fernando Paulista Cotian**  
**(Organizador)**

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia 3** .....



**Luís Fernando Paulista Cotian**

(Organizador)

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia**

## **3**

Atena Editora

2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 3 [recurso eletrônico] / Organizador  
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena  
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-086-5

DOI 10.22533/at.ed.865193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.  
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de  
responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos  
autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume III apresenta, em seus 11 capítulos, conhecimentos relacionados a Gestão Energética relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Gestão de Recursos Naturais e Produção mais Limpa e Ecoeficiência.

A área temática de Gestão Energética trata de temas relevantes para a geração, manutenção e gerenciamento de assuntos relacionados à energia elétrica. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de Gestão Energética, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Gestão Energética e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1 ..... 1**

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA CONCENTRAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO

*Hugo Tavares Vieira Gouveia*  
*Luiz Fernando Almeida Fontenele*  
*Rodrigo Guido Araújo*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931011**

### **CAPÍTULO 2 ..... 19**

CONFLITO ENTRE ENERGIA ASSEGURADA E HIDROGRAMA AMBIENTAL: O RIO SÃO FRANCISCO ESTÁ MORRENDO?

*Paulo Roberto Ferreira de Moura Bastos*  
*Mônica Silveira*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931012**

### **CAPÍTULO 3 ..... 35**

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE MONITORAÇÃO CONTÍNUA POR ANÁLISE DE IMAGEM DO ESTADO DE CHAVES DE CIRCUITOS ALIMENTADORES EM SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO

*Lourival Lippmann Junior*  
*Bruno Marchesi*  
*Rafael Wagner*  
*Amanda Canestraro de Almeida*  
*Vanderlei Zarnicinski*  
*Bogdan Tomoyuki Nassu*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931013**

### **CAPÍTULO 4 ..... 54**

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE PILHA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO COM POTÊNCIA DE GERAÇÃO DE 1 KW

*Gabriel Leonardo Tacchi Nascimento*  
*Jacqueline Amanda Figueiredo dos Santos*  
*Rubens Moreira Almeida*  
*Tulio Matencio*  
*Rosana Zacarias Domingues*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931014**

### **CAPÍTULO 5 ..... 73**

EQUIPAMENTO COM RECONHECIMENTO DINÂMICO DE IMAGEM PARA AVALIAÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA EM CAMPO

*Fernanda Soares Giannini*  
*Ronaldo Borges Franco*  
*Joel Machado Campos Filho*  
*Ricardo Toshinori Yoshioka*  
*Jean Marcos Andery Baracat*  
*José Eduardo Bertuzzo*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931015**

<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>87</b>
GERENCIAMENTO ENERGÉTICO PARA MICRORREDES: DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO PILOTO	
<i>Victor Maryama</i>	
<i>Vitor Seger Zeni</i>	
<i>Frederico Viveiros Jordan</i>	
<i>Cesare Quinteiro Pica</i>	
<i>Erlon Cristian Finardi</i>	
<i>Gabriel Aurélio de Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931016</b>	
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>107</b>
INJEÇÃO MÁXIMA DE MW POR GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM ALIMENTADOR PRIMÁRIO	
<i>Henrique Mesquita Tonhá</i>	
<i>Romário Pereira Marinho</i>	
<i>Antônio César Baleeiro Alves</i>	
<i>Luis Gustavo Wesz da Silva</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931017</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>123</b>
SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O ENERGYPLUS: UMA APLICAÇÃO VOLTADA AOS EDIFÍCIOS INTELIGENTES	
<i>Abraão Gualbeto Nazário</i>	
<i>Raimundo Celeste Ghizoni Teive</i>	
<i>João Zico Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931018</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>137</b>
VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING TO ELECTRIC TRANSDUCTION IN A HIGH EFFICIENCY ELECTRIC VEHICLE	
<i>Jólio Ribeiro Maia Neto</i>	
<i>Ícaro Lofego Mota</i>	
<i>João Alexandrino Bemfica Neto</i>	
<i>Douglas da Costa Ferreira</i>	
<i>Fábio Roberto Chavarette</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931019</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>141</b>
MAPEAMENTO DA GOVERNANÇA DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	
<i>Tássia Fonseca Latorraca</i>	
<i>Raquel Naves Blumenschein</i>	
<i>Maria Vitória Ferrari</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.86519310110</b>	
<b>CAPÍTULO 11.....</b>	<b>157</b>
OTIMIZAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA SOLAR COM O USO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS E REFLETORES MÓVEIS	
<i>Cynthia Beatriz Scheffer Dutra</i>	
<i>Jean Paulo Rodrigues</i>	
<i>Paulo César Sedor</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.86519310111</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR .....</b>	<b>167</b>

## GERENCIAMENTO ENERGÉTICO PARA MICRORREDES: DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO PILOTO

### **Victor Maryama**

Fundação Certi  
Florianópolis – SC

### **Vítor Seger Zeni**

Fundação Certi  
Florianópolis – SC

### **Frederico Viveiros Jordan**

Fundação Certi  
Florianópolis – SC

### **Cesare Quinteiro Pica**

Fundação Certi  
Florianópolis – SC

### **Erlon Cristian Finardi**

LabPlan – Universidade Federal de Santa  
Catarina  
Florianópolis – SC

### **Gabriel Aurélio de Oliveira**

ENGIE  
Florianópolis – SC

**RESUMO:** Este artigo apresenta o desenvolvimento e resultados computacionais de um sistema de gerenciamento energético para aplicação em microrredes inteligentes. Este trabalho se insere no contexto de um projeto de P&D mais amplo, cujo objetivo é a implantação de uma microrrede experimental conectada ao sistema de distribuição, abrangendo desde o desenvolvimento de soluções de eletrônica de potência, automação, comunicação e

controle até o estudo e proposição de modelos comerciais. Especificamente, este artigo apresenta a estratégia de gerenciamento energético que foi desenvolvida, incluindo modelos e algoritmos de otimização utilizados, descritivo de uma plataforma de simulação criada no projeto e validação computacional dos resultados obtidos no trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerenciamento energético, Microrredes, Otimização, Redes elétricas inteligentes.

**ABSTRACT:** Este artigo apresenta o desenvolvimento e resultados computacionais de um sistema de gerenciamento energético para aplicação em microrredes inteligentes. Este trabalho se insere no contexto de um projeto de P&D mais amplo, cujo objetivo é a implantação de uma microrrede experimental conectada ao sistema de distribuição, abrangendo desde o desenvolvimento de soluções de eletrônica de potência, automação, comunicação e controle até o estudo e proposição de modelos comerciais. Especificamente, este artigo apresenta a estratégia de gerenciamento energético que foi desenvolvida, incluindo modelos e algoritmos de otimização utilizados, descritivo de uma plataforma de simulação criada no projeto e validação computacional dos resultados obtidos no trabalho.

**KEYWORDS:** Gerenciamento energético,



## 1 | INTRODUÇÃO

No contexto das Redes Elétricas Inteligentes, o conceito de Microrrede vem se tornando uma abordagem cada vez mais atrativa de geração distribuída e consumo eficiente, podendo propiciar melhorias em questões técnicas de disponibilidade e qualidade de energia em diferentes aplicações, como também novos modelos comerciais e de operação de sistemas elétricos. Uma microrrede pode ser definida como um agrupamento de unidades de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia e cargas locais, operando de forma integrada por meio de redes elétricas e de comunicação e controle. Em geral, uma microrrede possui um contorno bem definido e um único ponto de conexão com a rede elétrica externa (LASSETER, 2002) (LOPES, MOREIRA e MADUREIRA, 2006) (HATZIARGYRIOU, ASANO, *et al.*, 2007) (DOE, 2012). Pode trabalhar no modo conectado ou no modo ilhado e deve possuir um sistema de controle e gerenciamento energético que faz com que uma microrrede se apresente ao sistema elétrico como um único consumidor-produtor de energia, bem controlado.

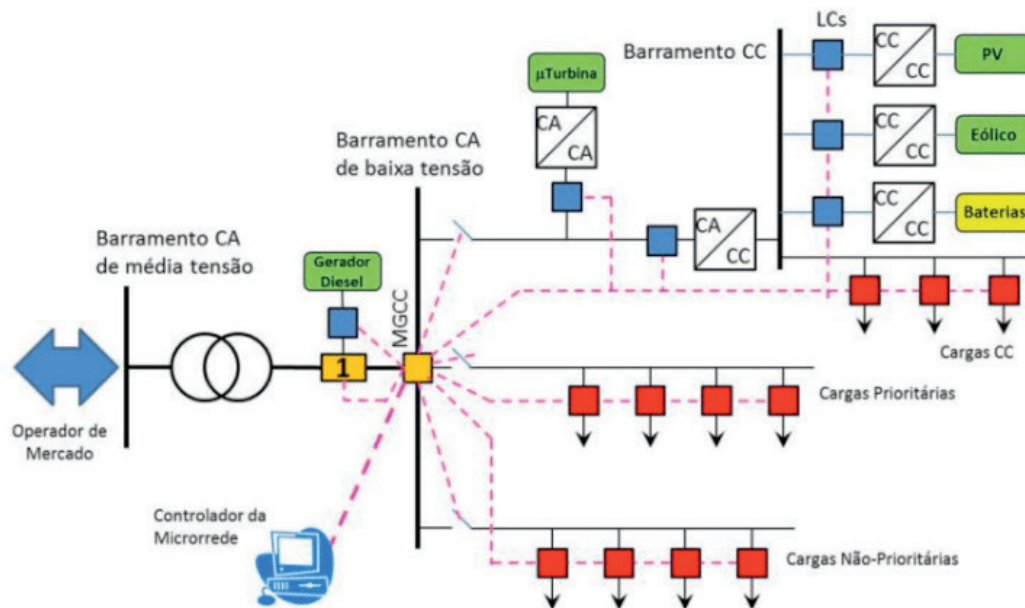


Figura 1 - Diagrama conceitual de uma microrrede

A Figura 1 exemplifica uma topologia de uma microrrede inteligente, onde estão presentes os seguintes componentes principais: geração distribuída baseada em fontes renováveis (fotovoltaica e eólica); geradores despacháveis (microturbina à gás e gerador à diesel); sistema de armazenamento de energia, para atuação em casos de operação em modo ilhado ou para prestação de serviços de suporte à rede elétrica; barramentos em corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC); cargas



locais CA e CC com diferentes requisitos de prioridade em caso de falhas na rede elétrica; conversores estáticos de potência; ponto de acoplamento com a rede elétrica externa (no caso da figura, representada por uma rede em média tensão); sistemas de proteção e manobras; controladores locais das unidades de geração distribuída e das cargas locais; e um sistema de controle central, representado como MGCC (Microgrid Central Controller).

As microrredes podem atender diferentes aplicações, como: instalações industriais e estabelecimentos comerciais (sendo que nesse caso os elementos da microrrede poderão estar instalados no sistema de um único consumidor); em edificações e condomínios residenciais; e em partes da rede de distribuição (nesse caso os elementos da microrrede poderão estar instalados em diferentes consumidores). Durante a operação da microrrede em modo conectado, poderá haver intercâmbio de energia entre a microrrede e a rede externa, dependendo da disponibilidade de excedente de energia na microrrede e/ou por eventual despacho a partir de agente operador da microrrede. Durante a operação ilhada, poderão ocorrer diversas outras situações, por exemplo: em caso de excedente de geração renovável, essa energia pode ser usada para a recarga do sistema de baterias; em caso de demanda maior que a geração renovável, pode haver descarte seletivo de cargas (de acordo com priorização), ou o acionamento de baterias ou de máquinas despacháveis para atender o balanço energético da microrrede. Em ambos os modos de operação, mas também nos momentos de transição entre os modos, um elemento fundamental é o MGCC, que será denominado Gerenciador Energético (GE).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento energético para uma microrrede inteligente experimental. Este trabalho se insere como uma das atividades de pesquisa e desenvolvimento do projeto “Desenvolvimento e Implantação de Microrredes Inteligentes: Estratégias de Controle para Integração de Sistema e Gerenciamento de Energia”, código ANEEL PD 0403-0017/2011, o qual é financiado pela Tractebel Energia e que se encontra fase em execução. O projeto conta com pesquisadores da própria Tractebel, da Fundação CERTI, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e da empresa Supplier. Os objetivos do projeto como um todo são: (a) desenvolvimento de técnicas de controle e gerenciamento energético para microrredes; (b) implantação de uma microrrede inteligente piloto de 90 kWp e (c) desenvolvimento de modelo comercial para novos negócios na área de geração distribuída e redes elétricas inteligentes. A originalidade desse projeto está na forma como as estratégias de controle serão realizadas e implantadas, integrando microgeradores, acumuladores de energia e cargas (críticas e normais) em uma microrrede híbrida (CC e CA). O foco do projeto, portanto, é na inteligência da rede, visando um sistema eficiente, confiável e econômico, e que possa se caracterizar como uma solução atrativa para o setor elétrico.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção II apresenta-se

uma descrição geral sobre gerenciamento energético e especificações de modelos e estratégias utilizadas no projeto. A plataforma desenvolvida no projeto de simulação estática e dinâmica da microrrede é apresentada na Seção III. A seção IV apresenta os resultados de simulação do projeto. Por fim, a seção VI apresenta as conclusões do trabalho.

## 2 | GERENCIAMENTO ENERGÉTICO

Em termos gerais, o GE de uma microrrede visa definir uma estratégia de operação para as fontes de geração, e podendo atuar também no controle da demanda interna, isto é, o estado operativo (ligado/desligado) e o nível de geração das mesmas, ao longo de um determinado horizonte de tempo, que atenda algum critério pré-definido (em alguns casos tem-se a utilização de múltiplos critérios). A estratégia de operação a ser obtida deve levar em consideração uma série de restrições operativas individuais das fontes, cargas e outros componentes da microrrede, bem como as denominadas restrições sistêmicas tais como o atendimento à demanda, os requisitos de reserva, os intercâmbios com a distribuidora de energia elétrica, por exemplo. Em função da natureza da atividade, isto é, atender um ou mais objetivos sujeito a uma série de restrições, o GE de uma microrrede é, em sua grande maioria, realizado com base na solução de um problema de otimização. A Figura 2 ilustra o conceito do GE (representado como MGCC), mostrando entradas e saídas desse sistema.

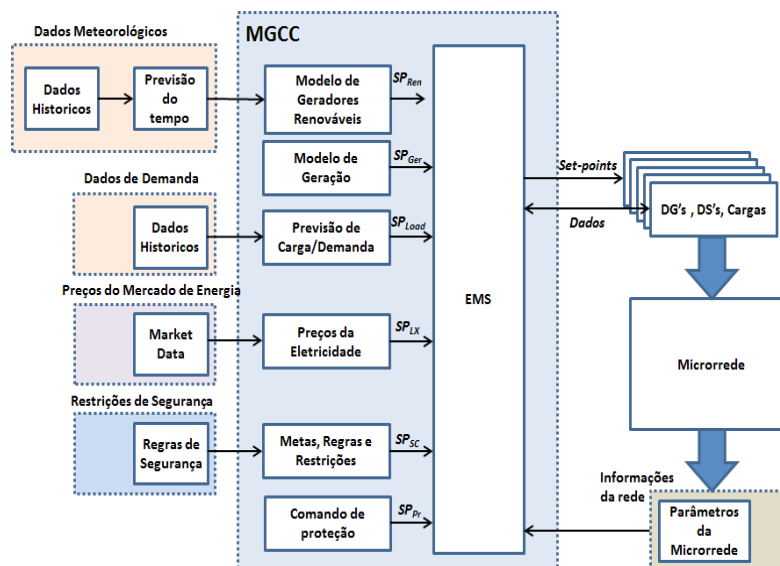


Figura 2 - Esquema conceitual do controlador central de uma microrrede

A partir de uma revisão bibliográfica (MORAIS, KÁDÁR, *et al.*, 2010) (LIU, 2010) (HOPKINS, PAHWA e EASTON, 2012) (KHODR, EL HALABI e GARCÍA-GRACIA, 2012) (MOHAMED e KOIVO, 2012) (GUO, BAI, *et al.*, 2012) (GOYA, SENJYU, *et al.*, 2012) (TAKEUCHI, HAYASHI, *et al.*, 2012) sobre o tema de gerenciamento energético em microrredes, faz-se a seguir um conjunto de observações:

(1) Com relação aos critérios utilizados, pode-se dizer que em sua grande maioria a função objetivo engloba um (ou mais) dos seguintes quesitos: custos de operação e manutenção, emissão de poluentes, rendimentos globais das unidades, custos de reserva, custos de carga e descarga de baterias, custos de partidas das unidades, custos associados às perdas do sistema de transmissão e ganhos/custos relacionados com a venda/compra de energia da concessionária;

(2) A grande maioria dos custos é representada por uma função linear. No caso das transações financeiras oriundas da transferência de energia com a concessionária, os autores admitem que exista um valor horário para o custo da compra de energia ao longo do horizonte de planejamento.

(3) No tocante às restrições utilizadas no GE, destacam-se: atendimento à demanda, requisitos de reserva, restrição de rampa das unidades termelétricas, mínimos tempos de partida e parada das unidades termelétricas, estados inicial e final de carga das baterias, rampas de carga e descarga das baterias, equação de transição de estados da carga das baterias, limites mínimos e máximos de geração de todas as unidades;

(4) Matematicamente o problema do GE é resolvido com base na solução de um modelo de otimização. O porte deste problema depende basicamente dos seguintes fatores: número de unidades geradoras, elementos de transmissão, tamanho do horizonte de planejamento e número de discretizações utilizadas ao longo do horizonte. Na sua grande maioria admite-se que o problema é de natureza determinística, isto é, consideram-se como aceitáveis as previsões de demanda, energia solar, energia fotovoltaica e preços de compra de energia.

(5) Nos artigos analisados os autores resolvem os modelos por meio de programas computacionais comerciais de programação linear inteira mista ou programação quadrática inteira mista. Tais programas fazem uso de métodos de programação linear/quadrática (e.g., pontos interiores) combinados com algoritmos de decomposição (e.g., branch and bound).

O problema de otimização para esta aplicação consiste em um problema de programação linear inteira-mista, por conter apenas equações lineares e variáveis de otimização que podem possuir tanto valores contínuos quanto discretos, que tem como objetivo buscar o conjunto de referências de potência para os recursos controláveis da rede de modo a minimizar o custo de operação no horizonte de previsão.

Dados como demanda e geração renováveis devem ser previstos durante este horizonte e conseqüentemente estão sujeitos a erros de previsão. Por tal motivo, o algoritmo é reexecutado periodicamente, de modo a incorporar diferentes informações acerca do estado operativo da rede e novas informações relativas a previsões.

Os aspectos de custo e funcionamento modelados serão mostrados a seguir.

## 2.1 Função Custo

A função custo representa a função que se quer minimizar no modelo de otimização da microrrede, dadas que as restrições sejam validadas. Esta procura representar o custo financeiro de operação da microrrede a cada instante de tempo, durante o horizonte de predição. É possível ainda atribuir custos arbitrários para comportamentos indesejados das fontes do sistema, como, por exemplo, variações exageradas de potência do sistema de armazenamento. A definição dos custos individuais para as fontes será detalhada a seguir.

## 2.2 Restrições de Operação

As restrições correspondem a situações que devem necessariamente ser atendidas pelas soluções como, por exemplo, o balanço de potência da microrrede (de forma que não haja nenhuma potência excedente ou faltante na microrrede), as limitações de máxima transferência de potência de inversores e níveis mínimos de reserva girante (com intuito de garantir uma reserva de potência para atender possíveis erros de estimativa da carga e das gerações renováveis sem que haja a necessidade de se realizar a partida de componentes adicionais).

## 2.3 Geradores Despacháveis

Os custos modelados para componentes como microturbinas a gás, geradores diesel e células a combustível correspondem à sua curva de consumo de combustível, custos de manutenção e custos correspondentes à partida e desligamento do mesmo. Além disso, o efeito da temperatura na eficiência das fontes foi modelado, bem como restrições de máxima variação de potência e de limitação do número máximo de partidas em um dado intervalo de tempo.

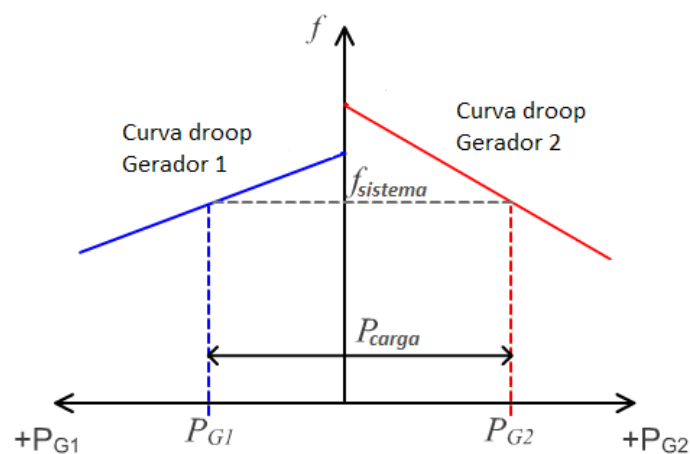


Figura 3 - Divisão de carga entre duas fontes devido ao droop de frequência

## 2.4 Rede Concessionária de Energia Elétrica

A rede elétrica é modelada de acordo com as tarifas de compra e venda de energia e limites de importação ou exportação de energia.

## 2.5 Banco de Baterias

Para o sistema de baterias, foram modeladas restrições de variação de potência e custos correspondentes ao desgaste de utilização.

## 2.6 Cargas Descartáveis

Em situações de falha, o gerenciador energético pode vir a descartar cargas, caso a energia disponível na microrrede não seja suficiente para atender todas as unidades consumidoras. Neste caso, associam-se custos para o desligamento destas cargas. Estes valores são arbitrários - cargas com prioridade maior devem ter um custo maior e ser descartadas com menor frequência.

Para evitar o chaveamento constante de cargas na microrrede, optou-se por associar um tempo mínimo de operação para cada carga após o religamento. Desta forma, a carga só pode ser desligada após ficar em operação durante certo período de tempo.

## 2.7 Outros

Outras parcelas incluem custos relacionados à falta ou excesso de energia no sistema.

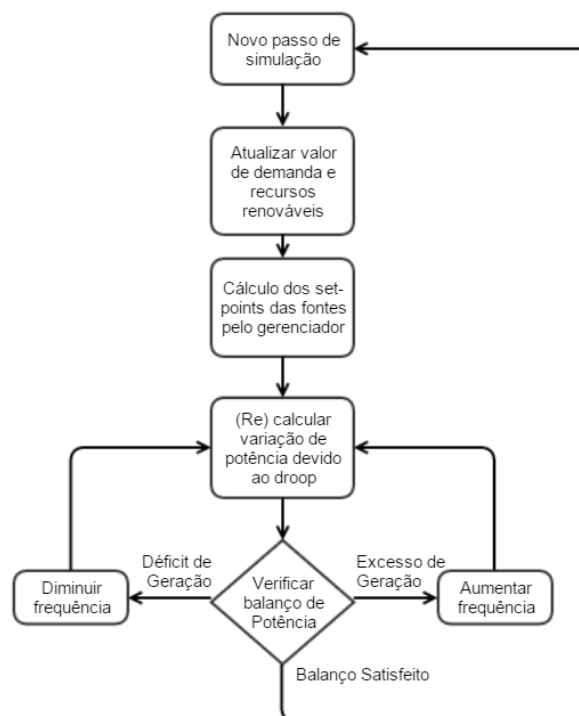


Figura 4 - Cálculo de potências e balanço energético por variação de frequência

### 3 | PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Para avaliar a eficácia e visualizar a operação do sistema sob diversas condições, uma plataforma de simulação foi concebida no contexto deste projeto. Esta plataforma consiste em duas diferentes instâncias: Simulação Estática e Simulação Dinâmica.

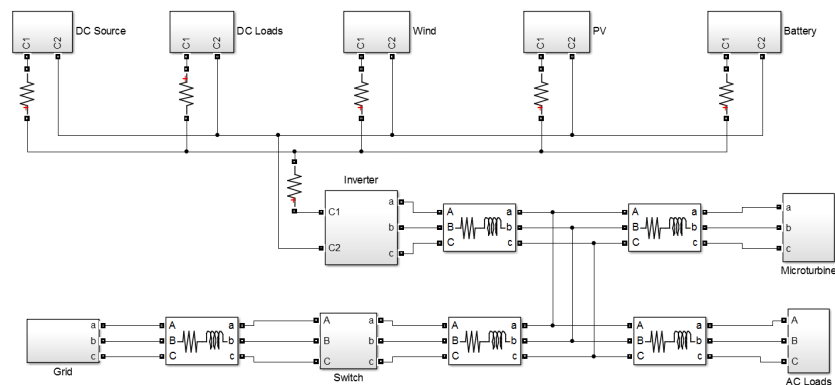


Figura 5 - Modelo de simulação dinâmica da microrrede

#### 3.1 Simulador Estático

A simulação estática corresponde apenas à operação das fontes em regime permanente, desconsiderando os transitórios intermediários entre estes pontos de operação, a partir de dados de entrada de demanda e de recursos renováveis (velocidade do vento e radiação solar).

Os níveis de geração renovável são calculados a partir de relações de conversão de recursos renováveis em potência, como curvas de geração em função da velocidade do vento para geradores eólicos e relações de geração fotovoltaica de acordo com a radiação solar.

O sistema é simulado a partir das potências geradas/consumidas a cada instante de tempo e o balanço energético é verificado, a partir dos algoritmos de gerenciamento energético escolhidos e das características de estatismo dos geradores, também conhecido como *droop*, conforme mostram a Figura 3 e Figura 4. Este esquema permite a divisão de carga que porventura venham a se tornar maiores ou menores que as referências impostas para as fontes e é necessário devido a variações entre os instantes de cálculo dos set-points de despacho, bem como de erros de previsão no cálculo do algoritmo de otimização.

#### 3.2 Simulador Dinâmico

A simulação dinâmica, por outro lado, contém modelos contínuos detalhados das dinâmicas dos componentes e da rede elétrica, bem como seus sistemas de controle. O modelo de simulação da microrrede é apresentado na Figura 5. A simulação dinâmica é executada a partir da seleção de diferentes pontos do resultado de operação da simulação estática e permite visualizar diferentes grandezas como frequência e amplitude das tensões, bem como variações de corrente e potências



nos componentes do sistema. Estes modelos foram desenvolvidos como fontes de tensão e corrente controladas de acordo com o componente em questão, incluindo conversores, geradores e cargas, incorporando diferentes características como estatismo (para geradores e conversores) e controle de potência. Os laços de controle foram implementados por meio de funções de transferência, em alguns casos utilizando PLLs para transformação de coordenadas dq0. A Figura 6 apresenta um exemplo das saídas disponíveis da simulação dinâmica.

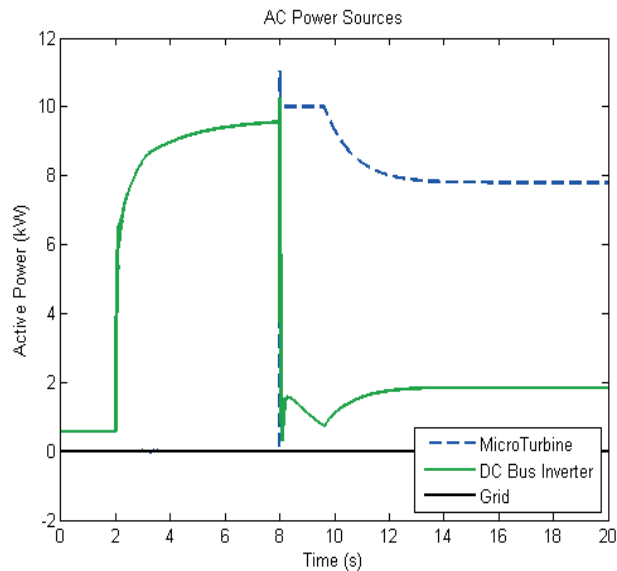


Figura 6 - Exemplo de resultado da simulação dinâmica

### 3.3 Arquitetura da plataforma conjunta

A arquitetura do sistema, mostrada na Figura 7, envolve elementos que operam em dois ambientes distintos, fazendo uso da plataforma de simulação matemática MATLAB e também da máquina virtual Java. A plataforma MATLAB é responsável por especificar a microrrede através de seus componentes e é também utilizada para a visualização dos resultados de operação. Já o gerenciamento das cargas e a dinâmica dos componentes é feita através de uma modelagem de otimização desenvolvida no ambiente Java.

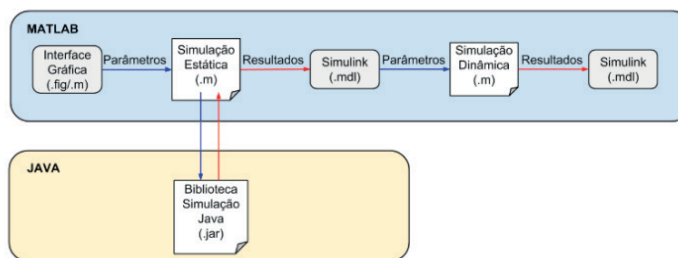


Figura 7 - Arquitetura da plataforma de simulação

O ambiente MATLAB foi utilizado para a criação das interfaces com o usuário,

entre elas a de configuração da microrrede e a de visualização dos resultados obtidos. É dentro do ambiente MATLAB também que roda o laço principal da simulação da microrrede, mas essa operação está fortemente ligada à utilização de funções que são disponibilizadas através da biblioteca de simulação desenvolvida em Java, acessadas pelo código MATLAB.

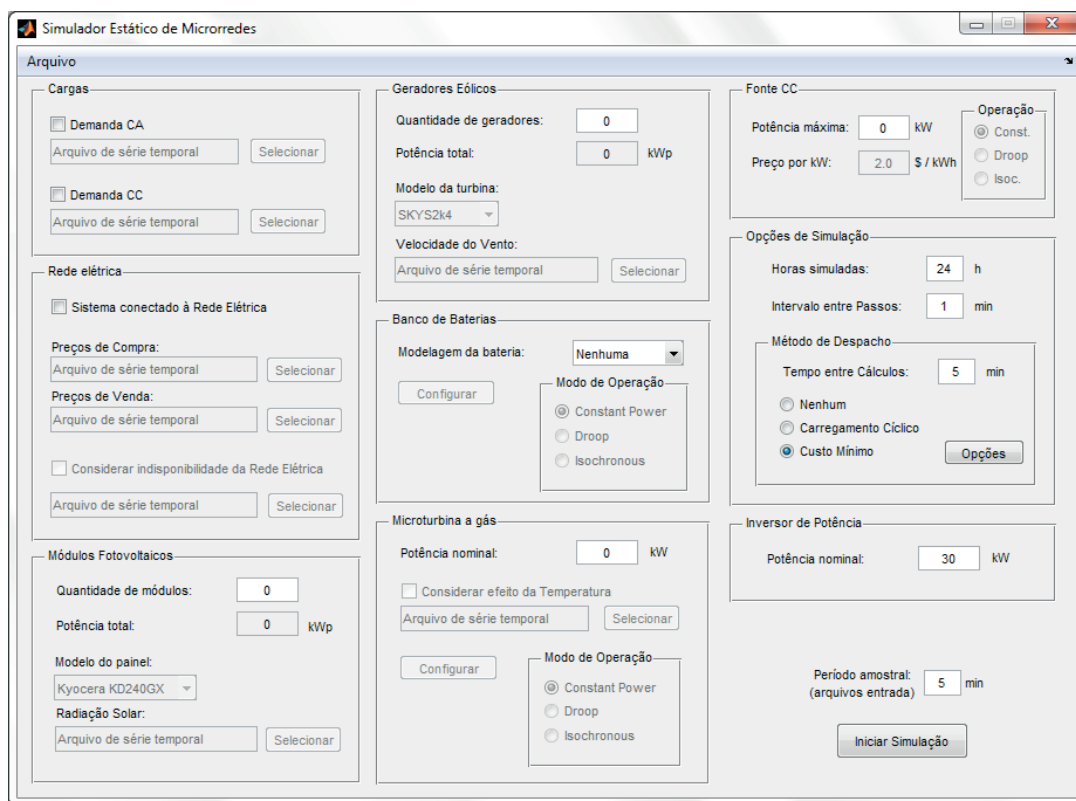


Figura 8 - Interface gráfica da plataforma de simulação desenvolvida para o projeto

### 3.4 Interface gráfica

A interface gráfica consiste um conjunto de painéis que representam a parametrização de cada um dos possíveis componentes da microrrede, sobretudo dimensionamento e custos de operação, além de algumas opções e configurações de simulação. Ela pode ser vista na Figura 8.

### 3.5 Parâmetros de Simulação e Método de Despacho

Em relação aos métodos de despacho, podem ser aplicadas duas estratégias distintas: A primeira, denominada Carregamento Cíclico, faz com que as fontes sejam despachadas quando a carga da bateria caia abaixo de um limiar, para serem desligadas quando a mesma atinge um patamar superior. A segunda estratégia tem por objetivo minimizar o custo total com a operação da microrrede, utilizando o algoritmo de otimização descrito anteriormente, que calcula o custo mínimo de operação da microrrede. Alguns parâmetros da estratégia de custo mínimo podem ser configurados, conforme mostra a Figura 9.

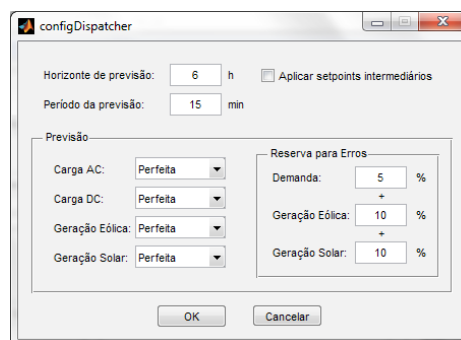


Figura 9 - Configurações do despacho ótimo

### 3.6 Opções do Otimizador

Na plataforma, pode-se também definir alguns parâmetros que definem o comportamento do otimizador. O horizonte de predição refere-se ao número de horas no futuro que o otimizador irá tentar prever para calcular o despacho ótimo. Um número alto de horas irá aumentar o desempenho do otimizador, mas em contrapartida aumenta exponencialmente o tempo necessário para encontrar a solução ótima, diminuindo a velocidade de simulação. É possível também definir a quantidade de pontos de previsão dentro do horizonte. Quanto maior a granularidade deste horizonte, menores serão os erros de previsão do otimizador, porém com um custo computacional mais elevado.

Além disso, pode-se escolher a qualidade da previsão em relação a cada um dos componentes da microrrede que devem ser estimados. Na previsão denominada Perfeita, as curvas de consumo e de geração previstas coincidem exatamente com os valores reais. Nesse modelo de previsão, o otimizador garante que seu modelo de despacho é realmente ótimo e é o custo mínimo para operar a microrrede. No modelo de previsão chamado Persistência, o gerenciador considera que os níveis de consumo e geração instantâneos serão mantidos durante todo o horizonte de predição. A previsão de Erro Aleatório garante que os valores previstos estão dentro de uma distribuição normal em volta do valor real. Por último, a previsão de Valor Médio considera que o nível de geração será constante durante todo o período, mantendo-se no valor médio da curva de geração inserida. Essa previsão garante que a soma da energia total da previsão será idêntica à curva real, mas mantendo a potência constante.

Alguns dos parâmetros de entrada do simulador são definidos como uma série temporal de valores. É o caso das curvas reais de recursos renováveis e de consumo, o preço do kWh ao longo do tempo ou a disponibilidade da rede. Para suprir a simulação com esses parâmetros, deve ser criado um arquivo em disco contendo a sequência completa de valores. Definidos todos os parâmetros, o usuário pode iniciar a simulação.

### 3.7 Exibição de resultados da Simulação Estática

O visualizador da simulação estática, exibido na Figura 10, consiste em uma

ferramenta para visualizar e analisar os sinais de entrada e de saída do sistema da microrrede. Ele apresenta a evolução dos sinais no tempo durante todo o período de simulação.

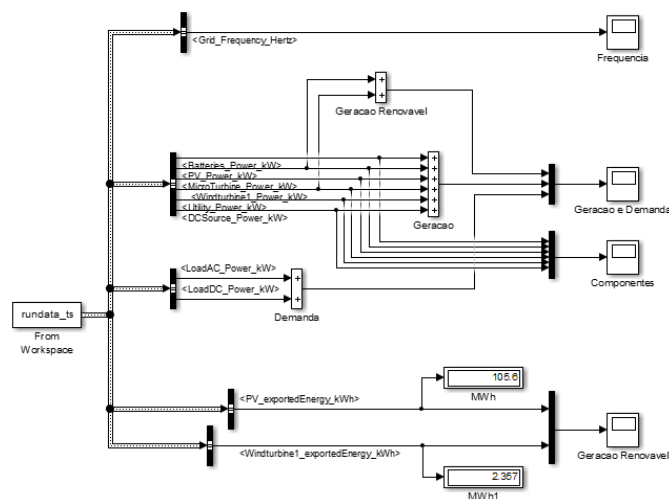


Figura 10 - Visualizador da simulação estática

Para oferecer uma maior flexibilidade na apresentação dos sinais e no poder de análise dos resultados, a saída do simulador é entregue na plataforma de simulação Simulink. Dessa forma, faz-se uso do método de programação por diagrama de blocos e também do grande número de bibliotecas disponíveis para a plataforma para exibição e manipulação dos resultados. Um exemplo de como os resultados da simulação estática são exibidos é apresentado na Figura 11.

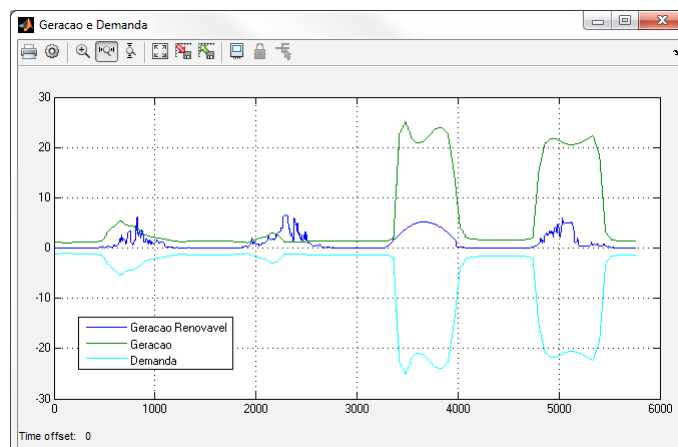


Figura 11 - Exemplo de resultados da simulação estática

### 3.8 Exibição de resultados da Simulação Dinâmica

A partir da exibição dos dados da simulação estática, o usuário pode especificar dois pontos que são usados como referência para as simulações dinâmicas, que realizará o cálculo das grandezas elétricas para uma variação entre os dois pontos de operação. Escolhidos os pontos, o modelo no Simulink é executado a partir do MATLAB, com os parâmetros e pontos de operação obtidos diretamente da simulação estática previamente executada. Terminadas as simulações dinâmicas, o usuário deve

escolher os gráficos que forem de seu interesse. As interfaces utilizadas se encontram na Figura 12.

A topologia do modelo dinâmico é fixa e corresponde àquela prevista para a implementação da microrrede propriamente dita em laboratório, de acordo com a Figura 5.

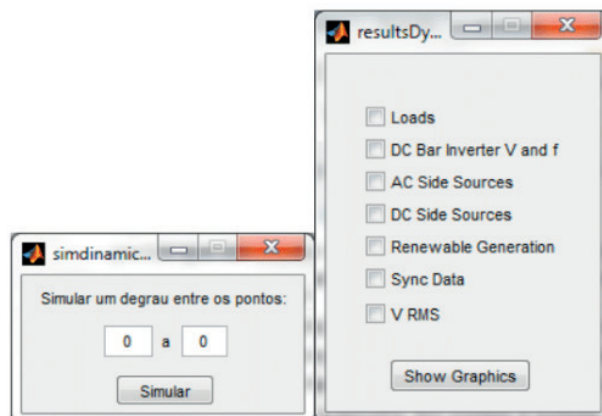


Figura12-Interface utilizada para inicialziar a simulação dinâmica

#### 4 | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para o levantamento dos resultados de comparação entre as diferentes estratégias de despacho, foram simuladas diferentes estratégias atuando em uma microrrede durante um período de 30 dias. A microrrede simulada possuía os mesmo componentes em todos os casos, variando-se apenas a estratégia de despacho do gerenciador energético e seus modelos de previsão de geração e consumo dos diferentes componentes elétricos da microrrede.

O cenário modelado nos testes era composto pelos seguintes componentes elétricos: uma microturbina a gás, um conjunto de painéis fotovoltaicos, um parque eólico, um conjunto de baterias e um modelo de carga representando a demanda a ser atendida. O modelo não considera uma conexão com uma rede elétrica externa, fazendo com que a microrrede opere de forma “ilhada”.

A carga a ser atendida é representada por um perfil de carga comercial (Figura 13), que consiste em um patamar de consumo relativamente constante e próximo ao pico durante o horário comercial e próximo a zero fora do horário comercial. O perfil foi dimensionado de forma a ter cerca de 20 kW durante seu patamar de consumo no horário de pico.

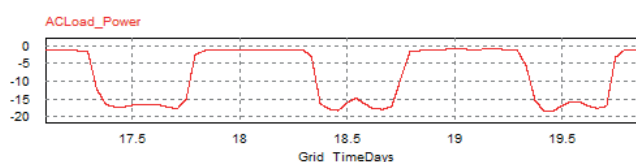


Figura 13 - Perfil de carga da demanda

Os painéis solares foram escolhidos de forma a suprirem a potência de pico da carga quando estão com geração máxima. Para tal, foram incluídos no modelo um conjunto de 80 painéis de 240 W, totalizando um potencial instalado de 19,2 kW. O perfil resultante é apresentado na Figura 14.

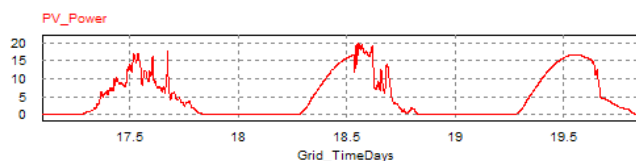


Figura 14 - Perfil de geração solar

O parque eólico foi dimensionado de forma análoga aos painéis, equiparando sua geração máxima com o consumo máximo da demanda. Assim sendo, foram simulados um conjunto de 9 turbinas eólicas de 2400 W, totalizando 21,6 kW instalados. O perfil de vento foi obtido de localidades próximas ao local de instalação da microrrede piloto deste projeto. A potência resultante do perfil de vento escolhido é apresentada na Figura 15.

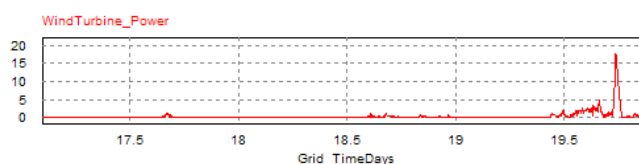


Figura 15 - Perfil de geração eólica

A microturbina foi inserida de forma a suprir a demanda quando a geração renovável não é suficiente. Foi definida uma potência máxima de 10 kW, cerca de metade do consumo no pico de demanda. Portanto, a microturbina não tem potência suficiente para manter a carga em seu consumo máximo, tendo que ser utilizada em conjunto com a geração renovável e a carga armazenada na bateria para garantir o balanço entre a geração e a demanda. Para contabilizar os custos com a microturbina, foram levantadas curvas de consumo de combustível para uma microturbina desse porte além do preço médio do combustível. Foram ainda considerados os tempos e potência de saída da microturbina quando ela encontra-se no período de partida e no período de desligamento. O plano de despacho de potência da microturbina ao longo da simulação é apresentado na Figura 16.

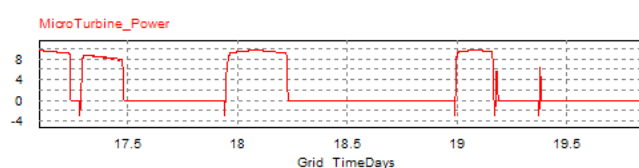


Figura 16 - Plano de potência de geração da microturbina

O conjunto de baterias incluído no modelo exerce uma forte influência no decorrer da operação. No caso de um banco de baterias muito grande, qualquer flutuação na



geração renovável é absorvida pela bateria, e a operação da microrrede torna-se trivial. Caso a capacidade seja muito baixa, há pouca folga para operar a microrrede e sua influência é suprimida (CHEN, GOOI e WANG, 2012). A capacidade escolhida foi de 80 kWh, o suficiente para manter a carga em potência máxima por cerca de 4 horas. Sua capacidade inicial foi definida como sendo 50% da capacidade total. Tanto o plano de potência quanto o estado de carga ao longo da simulação são apresentados na Figura 17.

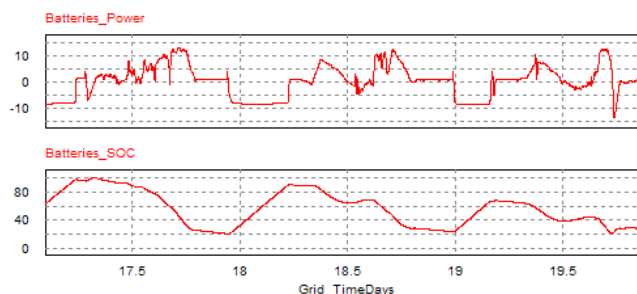


Figura 17 - Plano de potência da bateria

A Tabela 1 indica o dimensionamento dos componentes utilizados nas simulações:

Componente	Potência Máxima (kW)
Demanda	20
Microturbina a gás	10
Painéis Fotovoltaicos	19,2
Turbinas Eólicas	21,6

Tabela 1 - Dimensionamento dos componentes

Este cenário foi utilizado para testar a estratégia de custo ótimo frente à estratégia de carregamento cíclico.

A estratégia de custo ótimo cria uma previsão da potência de geração e de consumo de cada componente não-despachável durante um período de tempo, chamado horizonte de predição. Esses dados são então alimentados em um otimizador que calcula a potência dos componentes despacháveis que opera a microrrede com o menor custo possível, garantido o seguimento das restrições técnicas dos componentes e as restrições de comportamento desejado da microrrede. Essa técnica nos garante um despacho com o custo otimizado ao longo de todo o horizonte de predição, considerando que a previsão de geração dos componentes não-despacháveis esteja correta.

Considerando a dificuldade de se ter uma previsão precisa, principalmente dos componentes que dependem da disponibilidade de recursos naturais, a mesma estratégia foi testada utilizando uma previsão mais realista. Foram utilizados 3 métodos distintos de previsão. Para a carga, foram definidos erros aleatórios em cima de cada ponto do perfil real com um desvio padrão de 5% da potência instantânea. Para o perfil

de vento, cada ponto de cálculo considera a geração constante durante todo o período de previsão, com valor igual à média de geração dos últimos 60 minutos. Por fim, a geração solar é prevista de acordo com um perfil de geração baseado na irradiação solar máxima. Esse perfil é redimensionado de acordo com o nível de irradiação solar no instante calculado, assim considera-se que o percentual de redução em relação ao nível máximo de irradiação se manterá constante ao longo do horizonte de predição.

Como o cenário envolve uma forte contribuição de fontes de geração renováveis e a bateria não é grande o suficiente, houve excesso de energia em vários instantes ao longo do mês simulado. É importante que a estratégia de despacho seja capaz de gerenciar bem a carga da bateria para absorver a maior quantidade de energia possível, evitando a operação das fontes despacháveis nos momentos de maior demanda.

Utilizando a estratégia de carregamento cíclico, a microrrede passou por dois momentos onde há falta de energia ao longo do mês. Visto que a microturbina não possui potência suficiente para suprir a demanda, um bom gerenciamento da carga da bateria fez-se necessário para evitar tais cenários de contingência. Um dos momentos em que a bateria foi totalmente descarregada pode ser visto na Figura 18.

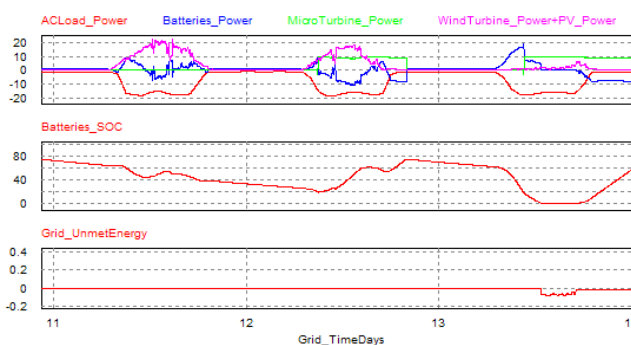


Figura 18 - Operação da microrrede com carregamento cíclico

No caso do despacho otimizado, como o horizonte de predição é de 24 horas, o gerenciador é capaz de prever as faltas de energia com certa antecedência e a microturbina foi ligada antes para carregar a bateria. Dessa forma, a bateria é capaz de auxiliar a geração da microturbina durante o período de pico e não há falta de energia, como exibido na Figura 19.

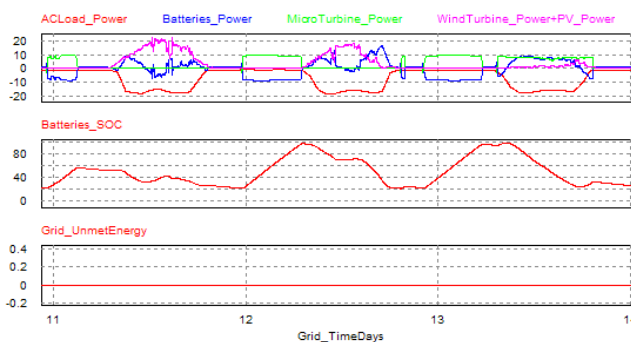


Figura 19 - Operação da microrrede com otimizador de previsão perfeita

A Figura 20 seguinte representa a operação da microrrede no mesmo período, incluindo os erros de previsão no horizonte do otimizador.

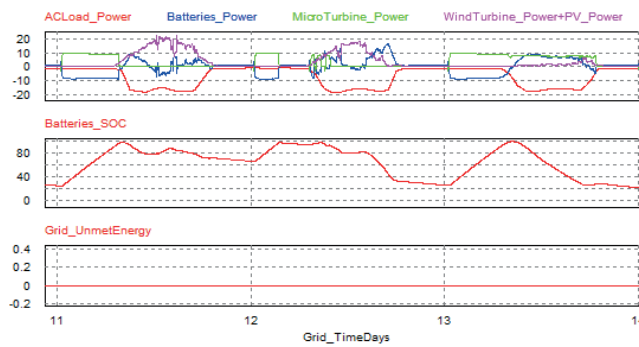


Figura 20 - Operação da microrrede com otimizador de previsão realista

Ao fim do mês de simulação, a estratégia de despacho cíclico apresenta uma falta de energia total de aproximadamente 34 kWh. A estratégia de custo ótimo, mesmo com erros de previsão, evitou os momentos de contingência. No caso da previsão perfeita, ainda houve uma notável redução na potência excedente, que foi mais bem aproveitada pela bateria.

Como a falta de energia não é contabilizada no levantamento de custos, percebe-se um aumento nos custos de operação da microrrede com a estratégia de despacho ótimo, pois a microturbina é utilizada mais vezes e por mais tempo para suprir a carga. Mesmo assim, o melhor aproveitamento da energia gerada a partir das fontes renováveis permite reduzir os custos de forma com que o otimizador com a previsão perfeita é capaz de atender a demanda ininterruptamente e a um custo menor em relação a estratégia de carregamento cíclico. Em contrapartida, para o caso com previsão não perfeita, os erros de previsão acarretam gastos adicionais, de modo que o custo total é superior em relação ao da estratégia de carregamento cíclico.

A Figura 21 mostra os resultados citados, na qual se pode observar, durante o período de simulação, a quantidade total de energia em excesso (geração maior que carga) e de déficits de energia (geração menor que carga). Já a Figura 22 apresenta um comparativo de custos entre as estratégias abordadas.

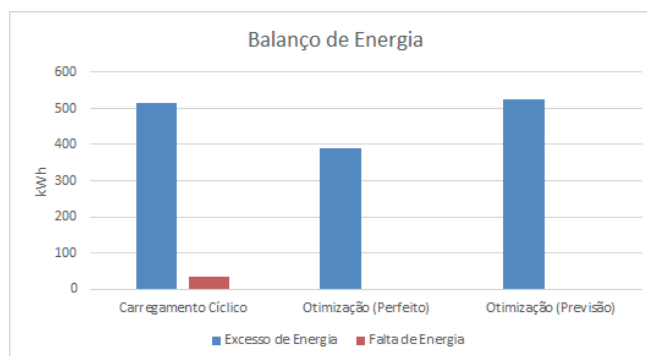


Figura 21 - Comparativo de balanço de energia entre estratégias de despacho

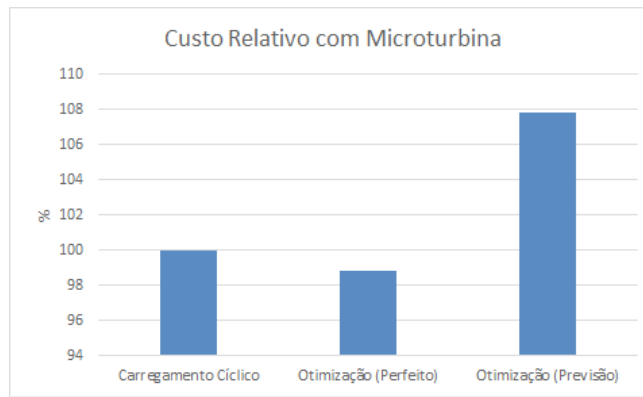


Figura 22 - Comparativo de custos entre estratégias de despacho

## 5 | IMPLEMENTAÇÃO

O controlador central se encontra implementado em um computador servidor que executa o algoritmo de otimização a partir das medições obtidas e envia as referências de potência para os recursos energéticos da microrrede. Para esta comunicação, o protocolo de comunicações MODBUS/TCP é utilizado, de modo que a estrutura de rede é baseada majoritariamente de interligações baseadas em links Ethernet.

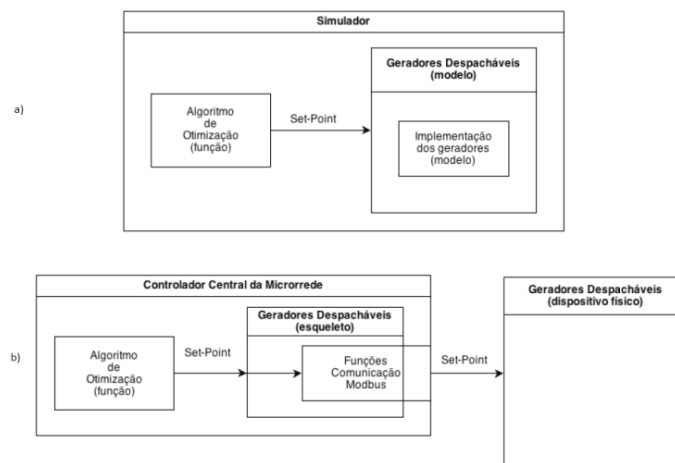


Figura 23 – Implementação do controlador central

A implementação do controlador central é baseada no código de otimização utilizado na plataforma de simulação, na qual as funções de interação com os modelos programados são substituídas por funções de comunicação Modbus, como mostra a Figura 23.

## 6 | CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o trabalho de desenvolvimento de um gerenciador energético para microrredes inteligentes, a ser aplicado em uma microrrede piloto,

que no momento encontra-se em fase de implantação no âmbito de um projeto de P&D ANEEL para uma empresa de geração de energia. O documento apresentou o problema do gerenciamento energético nos seus aspectos fundamentais, uma descrição dos modelos matemáticos adotados e das estratégias de otimização realizadas e implementadas no projeto. Foi também apresentada a plataforma de simulação de microrredes desenvolvida no P&D, que é na verdade a implementação do GE do projeto, pronto a ser integrado ao sistema físico assim que este estiver instalado. Com os resultados de simulações estáticas e dinâmicas realizadas a partir das ferramentas desenvolvidas, foram demonstrados os benefícios de um sistema de otimização inteligente para a gestão dos recursos energéticos da microrrede. A estratégia adotada no projeto faz com que a operação de uma microrrede com o GE seja mais vantajosa do ponto de vista econômico e também de garantia de disponibilidade de energia. Com base em modelos assumidos no projeto, os resultados mostram mais vantagens do GE quando a operação da microrrede ocorre em modo ilhado. Porém, mesmo em modo conectado, a implementação de um GE permite que a microrrede seja dimensionada com um custo inicial mais conveniente.

## REFERÊNCIAS

CHEN, S. X.; GOOI, H. B.; WANG, M. Q. **Sizing of Energy Storage for Microgrids.** *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 1, p. 142-151, 2012.

DOE. **Summary Report: 2012 DOE Microgrid Workshop.** Chicago, Estados Unidos. 2012.

GOYA, T. et al. **Optimal operation of thermal unit in smart grid considering transmission constraint.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 40, n. 1, p. 21-27, 2012.

GUO, C. X. et al. **Optimal generation dispatch with renewable energy embedded using multiple objectives.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 42, n. 1, p. 440-447, 2012.

HATZIARGYRIOU, N. et al. **Microgrids: An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects.** *IEEE Power Energy Magazine*, v. 5, n. 4, p. 78-94, 2007.

HOPKINS, M. D.; PAHWA, A.; EASTON, T. **Intelligent Dispatch for Distributed Renewable Resources.** *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 2, p. 1047-1054, 2012.

KHODR, H. M.; EL HALABI, N.; GARCÍA-GRACIA, M. **Intelligent renewable microgrid scheduling controlled by a virtual power producer: A laboratory experience.** *Renewable Energy*, v. 48, n. 1, p. 269-275, 2012.

LASSETER, R. H. **MicroGrids.** *Power Engineering Society Winter Meeting.* Nova Iorque, Estados Unidos: [s.n.]. 2002. p. 305-308.

LIU, X. **Economic Load Dispatch Constrained by Wind Power Availability: A Wait-and-See Approach.** *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 1, n. 3, p. 347-355, 2010.

LOPES, J. A. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. **Defining control strategies for MicroGrids islanded operation.** *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 2, p. 916-924, 2006.

MOHAMED, F. A.; KOIVO, H. N. **Multiobjective optimization using Mesh Adaptive Direct Search for power dispatch problem of microgrid.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 42, n. 1, p. 728-735, 2012.

MORAIS, H. et al. **Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming.** *Renewable Energy*, v. 35, n. 1, p. 151-156, Janeiro 2010.

TAKEUCHI, A. et al. **Optimal Scheduling Using Metaheuristics for Energy Networks.** *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 2, p. 968-974, 2012.



Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-086-5



9 788572 470865