



DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA OPERAÇÃO EM MICRORREDE
COM GERADORES DIESEL E REDUÇÃO DE EMISSÃO

Ulisses Anastácio de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA OPERAÇÃO EM MICRORREDE
COM GERADORES DIESEL E REDUÇÃO DE EMISSÃO

Ulisses Anastácio de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Aprovada por: Prof. Robson Francisco da Silva Dias
Prof. Bráulio César de Oliveira
Prof. Leonardo Willer de Oliveira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2023

Oliveira, Ulisses Anastácio de

Dimensionamento otimizado de um sistema de armazenamento de energia para operação em microrrede com geradores diesel e redução de emissão/Ulisses Anastácio de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XXII, 78 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 72 – 78.

1. Otimização. 2. Microrrede. 3. Armazenamento de energia. 4. Geradores diesel. 5. Navios. I. Francisco da Silva Dias, Robson. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

A Deus.

*Que vantagem tem o homem de
todo o seu trabalho, que ele faz
debaixo do Sol?
Eclesiastes 1:3*

Agradecimentos

Ao Criador do universo, arquiteto da matéria, da vida e da ciência, cujos atributos são imensuráveis ao seres humanos e que, por sua natureza grandiosa, é misericordioso com os homens.

Aos meus pais, Antônio Alves de Oliveira e Regina Célia Anastácio de Oliveira, que batalharam para que eu tivesse oportunidade de instrução educacional nos anos de ensino infantil e colegial para chegar à universidade federal. A gratidão vem à mente quando lembro do que vocês me proporcionaram em sinal de amor, mesmo com nossas dificuldades.

Aos meus irmãos, Ítalo Anastácio de Oliveira, Temístocles Anastácio de Oliveira e Vivian Régia Anastácio de Oliveira pelo companheirismo e pela amizade na infância e na adolescência. Quanta saudade de nossa convivência.

Ao meu orientador, Professor Robson Dias, agradeço o conhecimento transmitido, as lições aprendidas, a disponibilidade de uso da infraestrutura do Laboratório de Fontes Alternativas de Energia (LaFAE), a sempre presente cortesia nas nossas reuniões e a orientação que foi fundamental na minha trajetória nas disciplinas e na elaboração desse trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Professor Bráulio César de Oliveira e Professor Leonardo Willer de Oliveira, pela contribuição para correção, ajustes e melhorias na dissertação.

Ao Professor Fernando Antunes por ter feito minha recomendação ao curso de mestrado.

Ao CC(EN) Kleberon pelo acompanhamento das minhas atividades no mestrado e pela orientação na elaboração dessa dissertação.

Aos meus colegas de universidade, Emanuel, Gabriel, Janito, João, Luan, Paolo e Zaccaro, pelo apoio nas atividades e nos trabalhos acadêmicos.

Ao povo brasileiro, por meio da Marinha do Brasil e da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que em gerações apoia essas instituições seculares, as quais promoveram a oportunidade de me qualificar e evoluir profissionalmente, com dedicação integral, para exercer funções de engenharia elétrica e contribuir com a missão da força naval brasileira.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA OPERAÇÃO EM MICRORREDE
COM GERADORES DIESEL E REDUÇÃO DE EMISSÃO

Ulisses Anastácio de Oliveira

Dezembro/2023

Orientador: Robson Francisco da Silva Dias

Programa: Engenharia Elétrica

Apresenta-se, nesta dissertação, aspectos de sistemas de energia instalados a bordo de navios, configurações de redes elétricas com armazenamento de energia, medidas de redução de emissões de poluentes, formulações de problemas de gerenciamento de potências e simulação de modelos de geradores síncronos e sistema de armazenamento em microrrede. São apresentadas abordagens, como despacho ótimo, *unit commitment*, *demand side management*, e técnicas de otimização, como programação linear (LP), programação linear inteira mista (MILP), *particle swarm optimization* (PSO) e programação não linear inteira mista (MINLP) para gerenciamento de potências em microrredes. Em relação à implementação são feitas duas formulações para gerenciamento de potências. A primeira, formulação MINLP, com o objetivo de executar balanço energético de geradores diesel e sistema de armazenamento em microrrede, com curva de demanda de potência de 24h, e obter a capacidade de armazenamento de energia para obtenção dos melhores perfis de potência visando redução de consumo de combustível e de emissões de gases de efeito estufa e demais poluentes. A segunda, formulação MILP, é executada considerando-se os mesmos geradores diesel e capacidade de armazenamento obtida na primeira, com abordagem de otimização para cada valor de demanda separadamente, com vistas à operação real, por meio de otimizações sucessivas, de modo a obter o perfil de potência do armazenamento e dimensionar o conversor para ser usado em simulação. Quanto a dados obtidos, há redução de até 6% de consumo de combustível, redução de até 25% do tempo de operação dos geradores, além de apresentarem, em média, operação em regime otimizado durante 75% do período de operação. Os resultados da simulação demonstram validação das formulações utilizadas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

OPTIMIZED SIZING OF AN ENERGY STORAGE SYSTEM FOR
OPERATION IN A MICROGRID WITH DIESEL GENERATORS AND
EMISSION REDUCTION

Ulisses Anastácio de Oliveira

December/2023

Advisor: Robson Francisco da Silva Dias

Department: Electrical Engineering

This dissertation presents aspects of energy systems installed on board ships, configurations of electrical networks with energy storage, measures to reduce pollutant emissions, formulations of power management problems, and simulation of synchronous generator models and storage system in a microgrid. Approaches such as optimal dispatch, unit commitment, demand side management, and optimization techniques like linear programming (LP), mixed-integer linear programming (MILP), particle swarm optimization (PSO), and mixed-integer nonlinear programming (MINLP) for power management in microgrids are presented. Regarding implementation, two formulations for power management are made. The first, an MINLP formulation, aims to perform an energy balance of diesel generators and storage system in a microgrid, with a 24-hour power demand curve, and to obtain the energy storage capacity for achieving the best power profiles aiming at reducing fuel consumption and emissions of greenhouse gases and other pollutants. The second, a MILP formulation, is executed considering the same diesel generators and storage capacity obtained in the first, with an optimization approach for each demand value separately, aiming at real operation through successive optimizations, in order to obtain the power profile of the storage and size of the converter for use in simulation. As for the obtained data, there is a reduction of up to 6% in fuel consumption, a reduction of up to 25% in the operating time of the generators, and they operate, on average, in optimized regime during 75% of the operating period. The simulation results validate the formulations used.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Símbolos	xv
Lista de Abreviaturas	xx
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	2
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos	8
1.4 Estrutura da dissertação	8
2 Considerações sobre gerenciamento e otimização em redes elétricas a bordo de navios	10
2.1 Sistema de armazenamento de energia	11
2.2 Configuração de sistemas de energia convencionais em navios	13
2.3 Configuração de sistemas de energia com armazenamento	14
2.4 Considerações sobre emissões	17
2.5 Abordagens de gerenciamento de sistemas de energia	18
2.5.1 Despacho econômico	18
2.5.2 <i>Unit Commitment</i>	19
2.5.3 <i>Demand Side Management</i>	20
2.6 Algumas Técnicas de Otimização de Sistemas de Energia	21
2.6.1 Programação Linear (LP)	21
2.6.2 <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	21
2.6.3 Programação Linear Inteira Mista (MILP)	22
2.6.4 Programação Não Linear Inteira Mista (MINLP)	23
2.7 Trabalhos relacionados com gerenciamento de potências por meio de otimização	25
2.8 Conclusões parciais	27

3	Dimensionamento do armazenamento	28
3.1	Consumo específico de combustível	29
3.2	Gerenciamento virtual	31
3.2.1	Função objetivo	31
3.2.2	Restrições	32
3.3	Método de resolução	35
3.4	Execução do gerenciamento	38
3.4.1	Dados de inicialização	38
3.4.2	Resultado da otimização	38
3.5	Conclusões parciais	40
4	Gerenciamento de operação da microrrede	42
4.1	Consumo específico de combustível linearizado	43
4.2	Gerenciamento da operação da microrrede	44
4.2.1	Função objetivo	45
4.2.2	Restrições	46
4.3	Método de resolução	47
4.4	Execução da operação	48
4.4.1	Dados de inicialização	48
4.4.2	Resultado da otimização	49
4.5	Conclusões parciais	51
5	Simulação da microrrede	53
5.1	Sincronização do conversor do armazenamento	54
5.2	Controle de operação da microrrede	55
5.3	Controle de corrente e de potência do armazenamento	56
5.4	Configuração dos geradores	57
5.5	Execução da operação	59
5.5.1	Dados de inicialização	59
5.5.2	Resultado da simulação	60
5.6	Conclusões parciais	67
6	Conclusão	70
	Referências Bibliográficas	72

Lista de Figuras

1.1	arranjo do sistema elétrico usual em navios de combate da Marinha do Brasil.	3
1.2	curva proposta de consumo específico de combustível por nível de carregamento de geradores diesel BOVERI <u>et al.</u> [1].	4
1.3	condições de demanda e efeitos relacionados.	4
1.4	principais pontos do Anexo VI da MARPOL como medidas da IMO para redução de emissões.	6
1.5	percentual de emissões por transporte e transporte marítimo em relação a emissões globais.	6
1.6	emissões considerando demanda média equivalente a de uma navio de combate considerando fator de emissão.	6
1.7	emissões considerando demanda média equivalente a de um navio de combate e consumo específico extrapolado.	7
1.8	emissões considerando demanda média equivalente a de uma navio de combate, fator de emissão para cem dias de operação por ano com energia de terra no porto.	7
2.1	configuração de sistema elétrico híbrido com <i>power take-off</i> (PTO) e sistema de armazenamento.	14
2.2	diagrama de configuração provável de planta elétrica com sistema de armazenamento para aplicação futura em navios militares.	15
2.3	microrrede de navio com geradores diesel combinado com sistema de armazenamento com propulsão integrada (adaptado de MUTARRAF <u>et al.</u> [2]).	16
2.4	microrrede com geradores diesel, sistema de armazenamento e geração fotovoltaica integrados com propulsão e demais cargas com conexão feita por meio de barramento de corrente contínua (adaptado de ZAHEDI e NORUM [3]).	17
3.1	configuração da microrrede a ser utilizada na formulação.	29

3.2	curva de consumo específico de combustível por potência demandada de um gerador diesel com potência nominal de 1000 kW (adaptado de BOVERI <i>et al.</i> [1])	30
3.3	diagrama de resolução do problema do gerenciamento virtual com dimensionamento do armazenamento (adaptado de KHAN [4]).	36
3.4	curva de demanda de potência do navio considerada na otimização.	38
3.5	(a), (b), (c) potências dos geradores 1, 2 e 3, respectivamente, (d) potência do armazenamento, (e) estado de carga do armazenamento e (f) curva de demanda da microrrede.	39
3.6	(a), (b) e (c) estados dos geradores 1, 2 e 3, respectivamente, e (d), (e) e (f) comandos de partida e de parada dos geradores 1, 2 e 3, respectivamente.	40
4.1	linearização da curva de consumo específico de combustível dos geradores.	43
4.2	diagrama de resolução do problema de gerenciamento da microrrede na operação.	48
4.3	(a), (b) e (c) potências dos geradores e (d), (e) e (f) seus estados de operação.	50
4.4	(a), (b) e (c) comandos de partida e (d), (e) e (f) comandos de parada dos geradores.	50
4.5	potência (a) e estado de carga (b) do armazenamento.	51
4.6	curva dos valores referentes à parcela consumo específico de combustível calculado para todos os geradores em operação.	51
4.7	curva dos tempos de execução dos passos do algoritmo de otimização.	51
5.1	diagrama de controle do DSOGI-PLL WANG [5].	54
5.2	diagrama do SOGI WANG [5].	54
5.3	bloco de gerenciamento de potências, do estado de carga e indicação de estado dos geradores.	55
5.4	diagrama de controle de potência e de corrente <i>dq-frame</i> do conversor combinado com o controle do estado de carga do armazenamento por meio de otimização (adaptado de YAZDANI e IRAVANI [6]).	57
5.5	curva de ganho dB e de fase das funções de transferência da planta (a), do controlador proporcional-integral (b), da função de transferência de laço aberto (c) e da função de transferência de malha fechada (d) para as malhas de corrente.	58
5.6	<i>m-function</i> do <i>droop</i> de potência/frequência.	58
5.7	diagrama de blocos correspondente ao <i>script</i> do <i>droop</i>	59

5.8	<i>m-function</i> do gerenciamento da operação, <i>m-function</i> do <i>droop</i> , geradores, armazenamento, disjuntores e carga da microrrede.	59
5.9	<i>m-function</i> do gerenciamento da operação no <i>simulink</i>	61
5.10	curvas das referências de potências dos geradores (a), (b) e (c) e das curvas de acionamento dos disjuntores (d), (e) e (f) provenientes do <i>m-function</i> do gerenciamento da operação.	62
5.11	curvas da referência de potência do armazenamento (a) e da curva do estado de carga (b) provenientes do <i>m-function</i> do gerenciamento da operação.	62
5.12	valor da parcela custo proveniente do <i>m-function</i> do gerenciamento da operação.	62
5.13	curva do tempo de execução das otimizações do <i>m-function</i> do gerenciamento da operação.	63
5.14	<i>m-function</i> do <i>droop</i> P - ω modelado no <i>simulink</i>	63
5.15	microrrede modelada no <i>simulink</i> com três geradores de 1MW, um sistema de armazenamento 400 Ah-426 kWh e cargas com demanda variável.	64
5.16	conversor do armazenamento com filtro RL e bateria tipo lítio-íon, malhas de controle de corrente de eixo direto e de eixo em quadratura e DSOGI-PLL modelados no <i>simulink</i>	64
5.17	curva de potência ativa do armazenamento P^{arm} e sua referência P_{ref}^{arm} . 64	
5.18	detalhes da curva de potência do armazenamento nos intervalos (a) 0s a 5s e (b) 40s a 50s.	65
5.19	tensão de eixo direto v_d e de eixo em quadratura v_q no ponto comum de conexão dos componentes da microrrede.	65
5.20	corrente de eixo direto i_d e de eixo em quadratura i_q do sistema de armazenamento.	66
5.21	(a) potência ativa $P_{(1)}^{gen}$, potência ativa de referência $P_{(1)ref}^{gen}$ e (b) potência reativa $Q_{(1)}^{gen}$ do gerador 1.	66
5.22	(a) potência ativa $P_{(2)}^{gen}$, potência ativa de referência $P_{(2)ref}^{gen}$ e (b) potência reativa $Q_{(2)}^{gen}$ do gerador 2.	67
5.23	(a) potência ativa $P_{(3)}^{gen}$, potência ativa de referência $P_{(3)ref}^{gen}$ e (b) potência reativa $Q_{(3)}^{gen}$ do gerador 3.	67
5.24	estado de carga calculado SoC e real \overline{SoC} do armazenamento.	68
5.25	(a) potência da carga P^{dem} , potência ativa $\sum_j P_{(j)}^{gen} + P^{arm}$ das fontes e (b) potência reativa da carga da microrrede.	68

Lista de Tabelas

2.1	fatores de emissão de poluentes para óleo diesel marítimo pesado FA-BER <u>et al.</u> [7].	18
3.1	ilustração de correspondência entre valores de potências, de estados e de comandos de partida e de parada dos geradores.	33
3.2	considerações do gerenciamento virtual.	39
3.3	resumo dos resultados da otimização.	41
4.1	dados de entrada de operação.	49
4.2	comparativo entre operação convencional e otimizada.	52
5.1	dados de inicialização da simulação.	60

Lista de Símbolos

C_k^{pty}	custo associado a consumo de combustível correspondente à faixa de potência k dos geradores, p. 45
$C_{(ij)}^{pty}$	valor da função custo de consumo específico de combustível do gerador j no instante i no gerenciamento virtual, p. 31
D_{abc}	demanda de potência das fases abc, p. 4
E_{opt}^{arm}	capacidade do armazenamento de energia obtida no gerenciamento virtual, p. 39
F_{obj}^{opr}	função objetivo do gerenciamento da operação, p. 45
F_{obj}^{ger}	função objetivo do gerenciamento virtual, p. 31
G_P	grau do polinômio usado para o modelo de consumo específico de combustível, p. 30
N_G^{max}	número máximo de geradores em operação simultânea, p. 34
N_G^{min}	número mínimo de geradores em operação simultânea, p. 34
N_G	número de geradores da microrrede, p. 31
N_P	número de parcelas de potência para linearização do consumo específico de combustível, p. 44
N_S	número de intervalos de demanda de potência, p. 31
P_d^b	posição correspondente ao menor valor da função objetivo dentre todos os indivíduos i do modelo da PSO, p. 22
$P_{i,d}^b$	posição do indivíduo i correspondente ao menor valor da função objetivo do modelo da PSO, p. 22
P^{arm}	potência do armazenamento no gerenciamento da operação e na simulação, p. 46

$P_{(i)}^{arm}$	potência do armazenamento no instante i no gerenciamento virtual, p. 32
$P_{(i)}^{dem}$	demanda de potência no instante i , p. 33
$P_{(j)k}^{gen}$	variável de otimização correspondente à parcela de potência k do gerador j , p. 44
P_{max}^{gen}	potência máxima dos geradores, p. 35
P_{min}^{gen}	potência mínima dos geradores, p. 35
P^{nom}	potência nominal dos geradores, p. 58
P_{k-1}^{nom}	limite inferior da parcela de potência k , p. 44
P_k^{nom}	limite superior da parcela de potência k , p. 44
$P_{(ij)}^{gen}$	potência do gerador j no instante i do gerenciamento virtual, p. 31
SoC	estado de carga do armazenamento, p. 32
SoC_0	estado de carga inicial do armazenamento, p. 32
SoC_i	estado de carga do armazenamento no instante i no gerenciamento virtual, p. 32
SoC_f	estado de carga final do armazenamento, p. 32
V_{arm}	tensão cc do sistema de armazenamento, p. 56
$V_{i,d}$	velocidade de variação de posição do indivíduo i da população do modelo da PSO, p. 22
$X_{i,d}$	posição do indivíduo i representada por todas as variáveis consideradas no problema de otimização, p. 22
Δi_L	variação de corrente no indutor do conversor do armazenamento, p. 56
\mathbf{P}_i^{arm}	vetor de potências do armazenamento do gerenciamento virtual, p. 35
\mathbf{P}_{ij}^{gen}	matriz de potências dos geradores do gerenciamento virtual, p. 35

\mathbf{SoC}_i	vetor dos estados de carga do armazenamento do gerenciamento virtual, p. 35
\mathbf{u}_{ij}	matriz de estados dos geradores do gerenciamento virtual, p. 35
\mathbf{v}_{ij}	matriz de comandos de partida dos geradores do gerenciamento virtual, p. 35
\mathbf{w}_{ij}	matriz de comandos de parada dos geradores do gerenciamento virtual, p. 35
ω_c	frequência de cruzamento da função de transferência de laço aberto do controle de corrente do conversor do armazenamento, p. 57
ω_n	frequência angular nominal dos geradores, p. 54
ω_n^{pu}	frequência angular nominal dos geradores em pu, p. 58
$\omega_{(j)}^{\text{pu}}$	frequência angular do gerador j em pu, p. 58
\overline{SoC}	estado de carga anterior no gerenciamento da operação, p. 47
$\overline{u}_{(j)}$	estado anterior do gerador j do gerenciamento da operação, p. 45
sfoc	consumo específico de combustível, p. 30
θ	ângulo de fase da tensão da fase a no PCC, p. 56
a_k	coeficiente angular da curva de consumo específico de combustível correspondente à parcela de potência k , p. 43
b_k	coeficiente linear da curva de consumo específico de combustível correspondente à parcela de potência k , p. 43
c_1	fator de aprendizado do modelo da PSO, p. 22
c_2	fator de aprendizado do modelo da PSO, p. 22
f_{ch}	frequência de chaveamento do conversor do armazenamento, p. 56
h	período de cada intervalo do gerenciamento, p. 32
k_ω	coeficiente de inclinação, p. 58

$k_d(s)$	controlador proporcional-integral da malha de corrente de eixo direto do conversor do armazenamento, p. 57
k_i	ganho integral dos controladores $k_d(s)$ e $k_q(s)$, p. 57
k_p	ganho proporcional dos controladores $k_d(s)$ e $k_q(s)$, p. 57
$k_q(s)$	controlador proporcional-integral da malha de corrente de eixo em quadratura do conversor do armazenamento, p. 57
k_{ip}	ganho integral do controlador do PLL, p. 55
k_{pp}	ganho proporcional do controlador do PLL, p. 55
k_{sg}	ganho de malha do SOGI, p. 55
r_1	fator randômico do modelo da PSO, p. 22
r_2	fator randômico do modelo da PSO, p. 22
$u_{(ij)}$	estado de operação do gerador j no instante i do gerenciamento virtual, p. 31
$u_{(j)k}$	variável binária correspondente estado do gerador para a potência $P_{(j)k}^{gen}$, p. 43
$u_{(j)}$	estado do gerador j do gerenciamento da operação, p. 45
v_d	tensão de eixo direto no PCC, p. 56
v_q	tensão de eixo em quadratura no PCC, p. 56
$v_{(ij)}$	comando de partida do gerador j no instante i do gerenciamento virtual, p. 31
$v_{(j)}$	comando de partida do gerador j do gerenciamento da operação, p. 45
w_{pty}^{opr}	fator de ponderação para parcela de custo por consumo específico de combustível de geradores da função objetivo do gerenciamento da operação, p. 45
w_{std}^{opr}	fator de ponderação para parcela de comando de parada de geradores da função objetivo do gerenciamento da operação, p. 45

w_{stu}^{opr}	fator de ponderação para parcela de comando de partida de geradores da função objetivo do gerenciamento da operação, p. 45
w_J	constante de inércia de velocidade do modelo da PSO, p. 22
$w_{(j)}$	comando de parada do gerador j do gerenciamento da operação, p. 45
$w_{(ij)}$	comando de parada do gerador j no intervalo i do gerenciamento virtual, p. 33
w_{ess}	fator da soma ponderada da capacidade de armazenamento da função objetivo do gerenciamento virtual, p. 31
w_{pty}	fator da soma ponderada da parcela de consumo específico de combustível em conjunto com os estados dos geradores da função objetivo do gerenciamento virtual, p. 31
w_{stu}	fator da soma ponderada do somatório dos comandos de partida dos geradores da função objetivo do gerenciamento virtual, p. 31

Lista de Abreviaturas

AES	<i>auto export shipping</i> , p. 20
AMPL	<i>a mathematical programming language</i> , p. 37
API	<i>application programming interface</i> , p. 47
BESS	<i>battery energy storage system</i> , p. 12
CAES	<i>pumped hydrostorage and compressed air energy storage</i> , p. 12
CCS	captura e armazenamento de carbono, p. 11
CD	centro de distribuição, p. 2
CH ₄	metano, p. 18
CO ₂	dióxido de carbono, p. 18
CO	monóxido de carbono, p. 18
DCESS	sistema de armazenamento de energia distribuído em nuvem, p. 25
DCX	disjuntor de conexão de barramento, p. 2
DC	corrente contínua, p. 14
DG	disjuntor de gerador, p. 2
DI	disjuntor de interligação de quadros elétricos, p. 2
DP	posicionamento dinâmico, p. 11
DSM	<i>demand side management</i> , p. 20
DSOGI-PLL	<i>double second-order generalized integrator phased-locked loop</i> , p. 54
ECP	<i>extended cutting plane</i> , p. 36

EEDI	índice de projeto de eficiência de energia, p. 5
EEXI	índice de eficiência de energia de navios construídos, p. 5
ESS	sistema de armazenamento de energia, p. 12
FP	<i>feasibility pump</i> , p. 36
FSS	<i>flywheel storage systems</i> , p. 12
GAMS	<i>general algebraic modeling system</i> , p. 37
GD	geração distribuída, p. 11
GEE	gases de efeito estufa, p. 1
GLPK	GNU linear programming kit, p. 36
GOA	<i>global outer-approximation</i> , p. 36
IMO	organização marítima internacional, p. 1
IPOPT	<i>interior points optimizer</i> , p. 37
KKT	condições de otimalidade Karush-Kuhn-Tucker, p. 37
LP	programação linear, p. 21
MARPOL	<i>international convention for the prevention of pollution from ships</i> , p. 5
MEPC	comitê de proteção ambiental marítima, p. 5
MILP	programação linear inteira mista, p. 22
MIL	<i>model-in-the-loop</i> , p. 8
MINLP	programação não linear inteira mista, p. 23
MIQP	programação quadrática inteira mista, p. 26
NLP	programação não linear, p. 36
NO _x	óxidos de nitrogênio, p. 18
N ₂ O	óxido nitroso, p. 18
OA	<i>outer approximation</i> , p. 36
ONU	organização das nações unidas, p. 1

PCC	ponto comum de conexão, p. 29
PM	particulados resultantes de combustão, p. 18
PSO	<i>particle swarm optimization</i> , p. 21
PTO	<i>power take-off</i> , p. 14
QEP	quadro elétrico principal, p. 2
ROA	<i>regularized outer-approximation</i> , p. 36
SEEMP	plano de gestão de eficiência energética de navios, p. 5
SG	<i>smart grid</i> , p. 12
SMES	<i>superconducting magnetic energy storage</i> , p. 12
SOGI	<i>second-order generalized integrator</i> , p. 55
SO _x	óxidos de enxofre, p. 18
SSS	<i>supercapacitor storage systems</i> , p. 12
SoH	<i>state of health</i> , p. 71
UC	<i>unit commitment</i> , p. 19
VSD	equipamento para acionamento com frequência variável, p. 2

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de energia elétrica estão cada vez mais complexos e melhorias vislumbradas são de solução sofisticada, as quais necessitam de análise e formulação em vários aspectos, dentre eles: regulação de tensão, regulação de frequência, compartilhamento de potência, despacho de potência, fluxo de potência, demanda variável, alta demanda, dentre outros.

No âmbito das redes elétricas a bordo de navios, essas características são também relevantes para servir como considerações de projeto de sistemas elétricos, somados com o custo de combustível, emissão de gases de efeito estufa (GEE) e outros poluentes e custos de manutenção.

A Organização Marítima Internacional (IMO) realiza anualmente convenção para, dentre outros aspectos, atualizar ou aprimorar suas diretrizes que estabelecem limites de emissão de poluentes.

Considerando-se que há uso de combustíveis fósseis e emissão de poluentes pelos navios, os responsáveis pelas embarcações devem, caso sejam de países signatários dos tratados de convenções da Organização das Nações Unidas (ONU), aplicar diretrizes e decisões em acordos firmados naquela organização para elevação do uso de energia renovável e aproveitamento otimizado de combustível, além de tratamento de resíduos proveniente da queima de combustível.

Devido às pesquisas e trabalhos relacionados com otimização de microrredes incluindo-se considerações de projeto relacionados com otimização de despacho de potência e gerenciamento otimizado, os resultados dos referidos trabalhos poderão servir de base para aplicação de equipamentos que poderão ser utilizados nas embarcações em futuro próximo.

Com esse cenário, pode-se considerar que as pesquisas de microrredes podem ser usadas como plataforma para melhorias nas redes elétricas a bordo de navios, como por exemplo, na aplicação de sistemas de armazenamento, com otimização no dimensionamento e no gerenciamento da microrrede, de modo a permitir redução de horas de operação dos geradores a diesel, de emissão de gases de efeito estufa,

de custos de manutenção ao longo do ciclo de vida operativo dos geradores, além melhoria de qualidade de energia da rede.

Neste capítulo, são apresentados a natureza das fontes de energia e as configurações das estações de geração de energia a bordo de navios como breve contextualização, seguida com apresentação de motivos para os estudos que são realizados atualmente a cerca de otimização de microrredes e os objetivos do trabalho.

1.1 Contextualização

Equipamentos de eletrônica de potência estão se tornando populares no setor de transporte como uma solução promissora para melhorar a eficiência do combustível e, assim, reduzir as emissões. O transporte marítimo, que representa mais de 90% dos bens transportados globalmente, não é uma exceção a essa tendência. Como resultado, mais navios estão agora sendo equipados com acionamentos de velocidade variável (VSD) para cargas como bombas, ventiladores, propulsores e hélices. Dentre essas cargas, propulsores e hélices constituem grande parcela das cargas em microrredes de navios e, assim, a indústria marítima está experimentando crescimento extensivo no desenvolvimento das tecnologias associadas. Embora a propulsão elétrica esteja em desenvolvimento há quase um século, sua ampla proliferação, especialmente em navios de cruzeiro, começou apenas após a década de 1980 com o desenvolvimento de tecnologias de conversores de eletrônica de potência TARASIUK *et al.* [8].

O transporte marítimo de mercadorias representa mais de 70% do comércio mundial em termos de valor e 80% em termos de volume ON TRADE e STAFF [9], WORLD TRADE ORGANIZATION [10]. De acordo com estudos recentes, o transporte marítimo internacional emitiu cerca de 796 milhões de toneladas de CO₂ em 2012, o que corresponde a aproximadamente 2,2% da emissão total daquele ano. No entanto, previsões de médio prazo indicam que até 2050, um aumento entre 50% e 250% nas emissões de CO₂ devido ao transporte marítimo é possível, dependendo do futuro crescimento econômico e desenvolvimento energético. Vale destacar que o transporte marítimo é uma das principais atividades humanas e o principal sistema de transporte de mercadorias. Portanto, o interesse público, no aspecto ambiental, levou a regulamentações cada vez mais rigorosas sobre emissões de gases de efeito estufa BOVERI *et al.* [1].

Apesar do crescente avanço dos projetos de concepção de navios com relação a montagem de rede com propulsão elétrica, a maioria dos navios possui propulsão por meio de motores diesel segregada do sistema elétrico do meio naval. A Figura 1.1 apresenta diagrama com geradores de energia e suas conexões.

Os navios da Marinha do Brasil possuem geração de energia elétrica por meio de

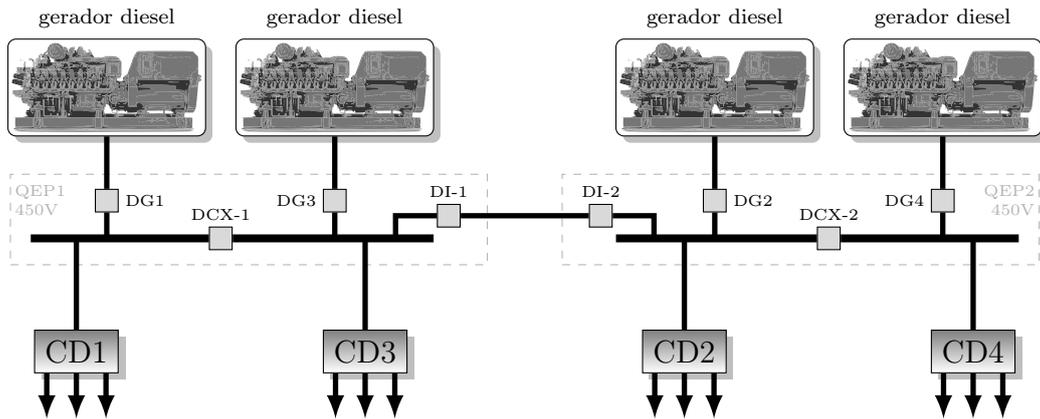


Figura 1.1: arranjo do sistema elétrico usual em navios de combate da Marinha do Brasil.

geradores diesel. Apesar de haver outros tipos de configurações de sistemas elétricos a bordo de navios, a força naval brasileira ainda não possui sistemas de geração de energia alternativos com sistema de armazenamento associado. Por outro lado, seus meios possuem alto grau de redundância e de qualidade os quais contribuem para confiabilidade dos sistemas de bordo, mas que, ainda assim, poderiam ser empregados novos equipamentos para alcançar maior robustez, melhorar qualidade de energia e aumentar a eficiência de geração diesel.

Como acontece em muitas aplicações em terra, onde ocorrem incertezas significativas relacionadas ao perfil de geração de energia devido às condições climáticas (por exemplo, usinas de geração de energia eólica e solar), a instalação de sistemas de armazenamento de energia pode ser vantajosa para cobrir as variações de carga flutuantes e aumentar a eficiência operacional, confiabilidade e flexibilidade da embarcação BOVERI *et al.* [1].

Pensando na possível aplicação de mais uma camada na esfera de confiabilidade do sistema elétrico a bordo de navios, este estudo apresenta análise de dimensionamento de sistema de armazenamento para sistemas elétricos convencionais, seja para os navios em operação, seja para os futuros meios navais a serem adquiridos.

1.2 Motivação

As redes elétricas a bordo de navios militares possuem considerações de projeto de concepção bastante conservadoras. Com isso, seus equipamentos são normalmente sobrequantificados ou sobredimensionados em relação à demanda de potência para garantir operacionalidade do sistema caso haja não disponibilidade de seus componentes por conta de falha, dano ou manutenção.

Outro detalhe relevante do ponto de vista de composição dos equipamentos elétricos, é a demanda que pode variar em função da condição de operação do meio

naval, especialmente nos navios de combate.

Geralmente, os navios possuem quatro condições de operação: porto, manobra de suspender ou de atracação, cruzeiro e combate ou missão principal. Essas condições determinam as cargas a serem utilizadas e a demanda a ser atendida e, portanto, espera-se diferentes níveis de carregamento dos geradores.

Os navios da Marinha do Brasil possuem geração de energia por meio de diesel e seu consumo de diesel é determinado pela demanda de potência de bordo. Em outro aspecto, o consumo de combustível pode variar de acordo com o carregamento dos geradores, como proposto por BOVERI et al. [1], cuja curva é apresentada na Figura 1.2.

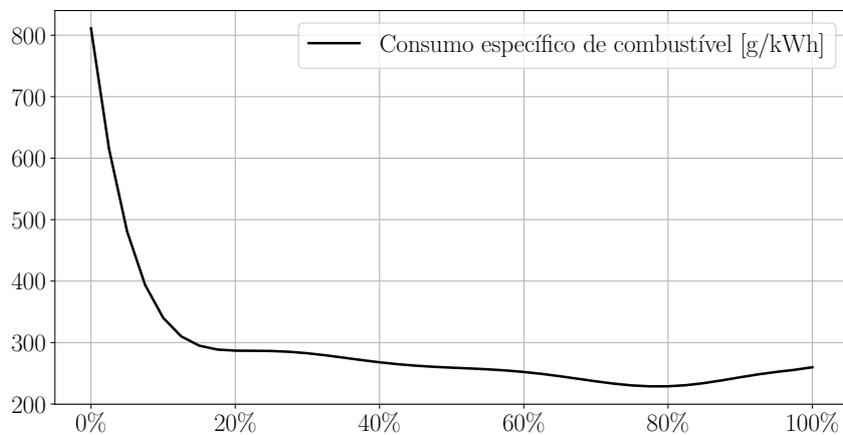


Figura 1.2: curva proposta de consumo específico de combustível por nível de carregamento de geradores diesel BOVERI et al. [1].

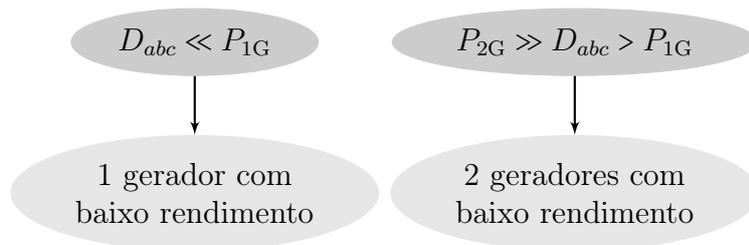


Figura 1.3: condições de demanda e efeitos relacionados.

A Figura 1.3 sintetiza as condições de demanda e os efeitos provenientes. Baseando-se nas curvas de consumo específico de combustível, nos casos de demanda D_{abc} bem inferior ao valor da capacidade de geração de um gerador P_{1G} e demanda superior a de um gerador e bem inferior a capacidade de dois geradores P_{2G} , resulta em baixo rendimento dos motores diesel.

Os navios possuem equipamentos de alto consumo de energia, como exemplos, *thrusters*, bombas de pressurização da rede de combate a incêndio, guindaste, dentre outros. Suas potências podem chegar a 50% da capacidade de uma unidade geradora

e seus transitórios são bastante severos para o sistema elétrico. Essas condições possuem influência direta na qualidade de energia da rede elétrica do navio.

Considerando-se as políticas de controle de emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar, há um robusto código normativo para ações de planejamento e de execução e índices de desempenho para redução dos níveis de emissão dos navios.

Apesar das forças armadas serem excluídas da obrigatoriedade do compromisso de redução de emissões de gases de efeito estufa, por razões de sensibilidade de dados operacionais, vislumbra-se que haja contestação dessa condição em alguns anos por sociedades de proteção ao meio ambiente e que os navios de marinha deverão possuir requisitos de projeto e de operação, assim como os demais navios, conforme estabelecem as convenções atuais.

Nas últimas décadas, o aumento nas emissões de gases de efeito estufa afetou severamente o clima global. Navios convencionais geralmente utilizam geradores a diesel e consomem combustíveis fósseis, e a queima desses combustíveis produz grande quantidade de GEE. De acordo com os dados de 2007 a 2015, a emissão de GEE da indústria de transporte marítimo global representa cerca de 3% da emissão global de GEE. Se nenhuma ação for tomada, a IMO estima que essa proporção aumentará para 17% até 2050. Assim, a IMO estabeleceu uma meta de que todos os navios construídos após 2025 devem reduzir as emissões de GEE em 30% em comparação com 2005. Diferentes governos também estabeleceram regras rigorosas para reduzir as emissões de GEE da indústria de transporte marítimo. Portanto, é essencial e significativo desenvolver tecnologias de economia de energia e redução de emissões para navios SUN *et al.* [11].

Ainda segundo SUN *et al.* [11], o gerenciamento de energia de navios convencionais tem sido amplamente estudado para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e controlar as emissões de GEE.

A IMO, por meio do Comitê de Proteção Ambiental Marítima (MEPC), estabeleceu a obrigatoriedade de redução da poluição do ar. O texto com ações e índices de desempenho foram incluídos em 2011, com aplicação a partir de 2013, com valores conforme tipo e deslocamento¹ dos meios marítimos, e estão incluídos no Anexo VI da *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships* (MARPOL). Em resumo, a Figura 1.4 mostra índice de eficiência e plano de eficiência em linha com ações e resultados a serem alcançados.

Em estudo realizado pelo referido comitê em 2020 com dados de 2018, *Forth IMO Greenhouse Gas Study* FABER *et al.* [7], incluindo-se as emissões por geração de energia e indústria, dados ilustrados na Figura 1.5, constatou-se que houve emissões globais da ordem 36,5 bilhões de toneladas de CO₂, sendo 2,9% deste valor, cerca de 1 bilhão de toneladas, provenientes dos meios de transporte, onde 740 milhões de

¹massa do fluido deslocado pela embarcação para se manter em equilíbrio estático.

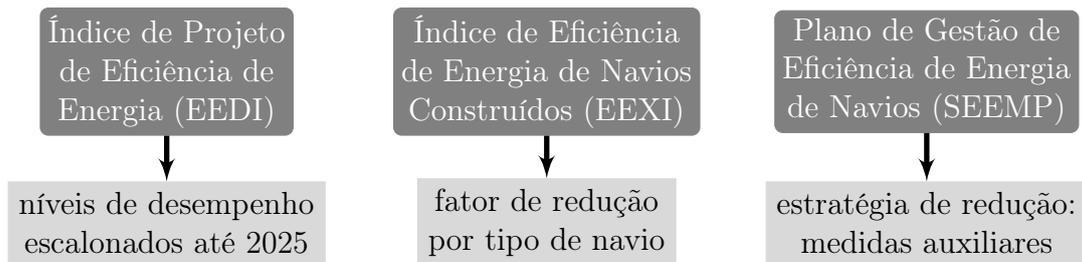


Figura 1.4: principais pontos do Anexo VI da MARPOL como medidas da IMO para redução de emissões.

toneladas teriam sido emitidos somente pelos meios marítimos, cerca de 75%.



Figura 1.5: percentual de emissões por transporte e transporte marítimo em relação a emissões globais.

Para se ter percepção da ordem de grandeza das emissões de um navio de combate com demanda média de 1MW, usando fatores de emissão diesel por unidade de energia de 0,702 tonCO₂/MWh MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA DO BRASIL [12], consumo específico de 250g/kWh, usado como fator conservador para estimativas preliminares, e quantidade de CO₂ produzida por litro de diesel, calcula-se que seriam emitidas por volta de 6.000 toneladas de CO₂ por ano, Figuras 1.6 e 1.7, apenas com geração de energia elétrica a bordo.

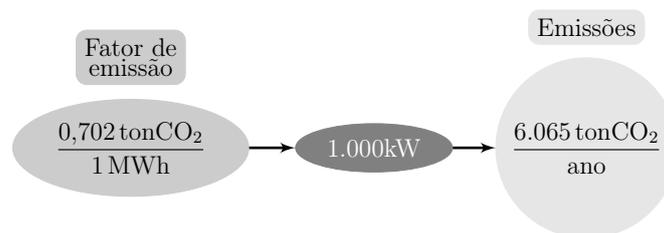


Figura 1.6: emissões considerando demanda média equivalente a de uma navio de combate considerando fator de emissão.

Por outro lado, considerando-se operação de um navio por cem dias no mar, período comum de navios com bom perfil operacional, admitindo-se fator de emissão diesel já referido de 0,702 tonCO₂/MWh, e permanecendo em atividade em atracção no porto, considerando-se fator de emissão do sistema interligado nacional de 0,5985 tonCO₂/MWh MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVA-

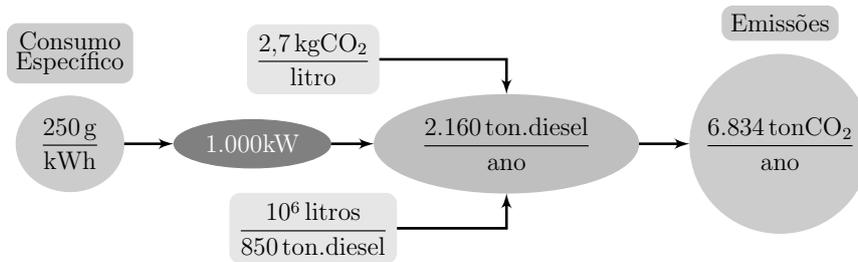


Figura 1.7: emissões considerando demanda média equivalente a de um navio de combate e consumo específico extrapolado.

ÇÕES DO BRASIL [13], como mostra a Figura 1.8, são produzidas quase 5.500 tonCO₂/ano, o que demonstra o potencial de emissão de navios militares.

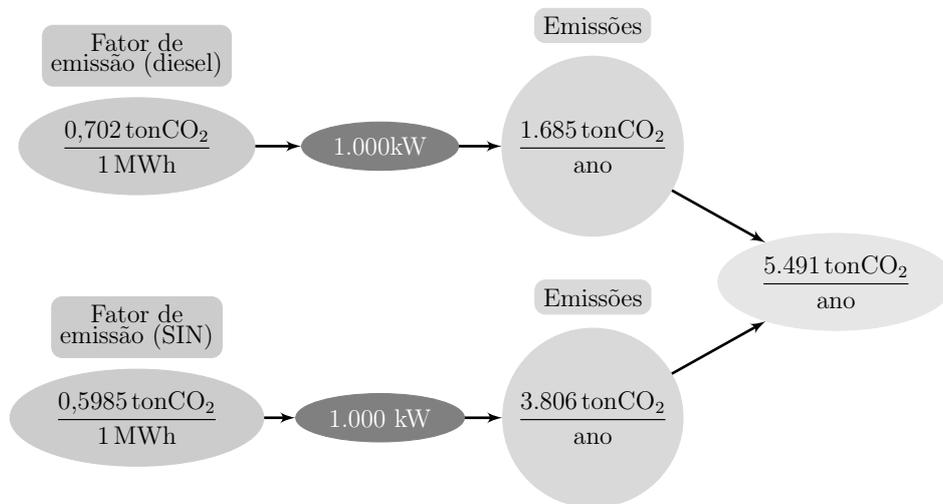


Figura 1.8: emissões considerando demanda média equivalente a de uma navio de combate, fator de emissão para cem dias de operação por ano com energia de terra no porto.

Considerando-se uma frota de 15 navios, teriam-se por volta de 105.000 toneladas de CO₂ por ano. Esses valores são considerados apenas para geração de energia elétrica, ou seja, os dados de emissão provenientes da propulsão convencional não são incluídos nos cálculos.

O controle de emissões de gases de efeito estufa provenientes de navios tornou-se parte importante dos esforços conjuntos da comunidade internacional para combater as mudanças climáticas. Com as leis e regulamentações cada vez mais rigorosas, a ênfase em sustentabilidade, baixa emissão de carbono, economia de energia e proteção ambiental se tornaram temas constantes para o desenvolvimento da indústria de transporte marítimo. O desenvolvimento e a utilização de novas fontes de energia são eficazes para alcançar a conservação de energia e a redução de emissões dos navios YANG e ZHANG [14].

1.3 Objetivos

Os objetivos principais dessa dissertação estão nos seguintes conjuntos globais: dimensionamento de um sistema de armazenamento, gerenciamento de uma microrrede com geradores diesel em conjunto com sistema de armazenamento e implementação de simulação *model in the loop* da aplicação por meio do *simulink*.

Para o primeiro objetivo, desenvolve-se formulação de um problema de gerenciamento virtual de uma microrrede, com função objetivo para minimização do tempo de operação dos geradores convencionais, do número de partidas dos geradores e do consumo de combustível e capacidade do sistema de armazenamento de energia. As restrições do problema estão relacionadas com a demanda de carga, o número mínimo e máximo de geradores convencionais que devem operar simultaneamente, e o estado de carga do armazenamento que deve excursionar na faixa linear do perfil recomendado de operação, bem como minimizar a capacidade de armazenamento considerando suas restrições, como exemplo, espaço disponível para instalação do armazenamento.

Para o segundo tópico, deve-se minimizar uma função objetivo que possui número de partidas dos geradores, número de paradas e consumo de combustível como variáveis primárias, considerando-se otimização para cada valor de demanda de potência. As restrições com relação a balanço de potências, estado de carga e geradores em operação são semelhantes às aplicadas no primeiro objetivo.

Com relação à simulação, pretende-se demonstrar a aplicação *model in the loop* de modo a verificar a otimização de função de custo de operação utilizando-se o *simulink* e verificar o efeito dos valores de referência de potência obtidos no gerenciamento da operação nos modelos de geradores síncronos, do armazenamento e da carga, em relação à estabilidade da microrrede.

1.4 Estrutura da dissertação

O capítulo 2 apresenta revisão bibliográfica em relação ao uso de sistema de armazenamento e bordo de embarcações marítimas, com abordagem de sistema de gerenciamento de energia, técnicas e métodos de resolução de problemas de otimização, e exposição de alguns trabalhos, de outros autores, relacionados com otimização em gerenciamento de microrredes.

O capítulo 3 aborda formulação de gerenciamento de potências, com restrições lineares e não lineares, para minimização de função custo de operação de microrredes com propósito de obter a capacidade do armazenamento correspondente ao melhor balanço energético do ciclo de operação diário de uma microrrede, de acordo com a função custo definida. O problema é modelado por meio de formulação de problema

de programação não linear inteira mista, o qual é resolvido por meio da biblioteca de modelagem *Pyomo* combinada com a interface *Mindtpy*, a qual utiliza os *solvers* *CBC*, para resolução da etapa linear, e *IPOPT* para resolução da etapa não linear.

O capítulo 4 apresenta formulação de gerenciamento de microrrede com o propósito de minimização de função objetivo composta custo por consumo de combustível, somatório de partidas e somatório de paradas de geradores diesel. A formulação é semelhante à apresentada no capítulo 3 mas a resolução da otimização do gerenciamento é executada para cada valor de demanda de potência. Cada passo de otimização se enquadra como um problema de programação linear inteira mista.

O capítulo 5 mostra simulação da microrrede abordada no capítulo 4. A microrrede é modelada no *simulink*. O gerenciamento é incluído em bloco *m-function* com uso do *solver* *intlinprog*, a qual é capaz de resolver problema modelados por meio de programação linear inteira mista. Alguns ajustes são feitos para fazer correspondência entre os intervalos considerados reais e os da simulação, onde é feita adaptação dos fatores utilizados no bloco de armazenamento pré-configurado do *simulink*.

O capítulo 6 sintetiza as observações dos capítulos anteriores e destaca, bem como válida, redução dos parâmetros de operação, além de concluir que o bloco de armazenamento do *simulink* responde de forma compatível com o modelo implementado nas otimizações e que não se apresenta instabilidade na simulação.

Capítulo 2

Considerações sobre gerenciamento e otimização em redes elétricas a bordo de navios

Atualmente, os sistemas de energia de navios passam por profunda transformação para alcançar a descarbonização. Pesquisas sobre tecnologia de energia limpa usada em navios, como energia eólica, GNL, energia nuclear, energia solar e eletricidade renovável (célula a combustível), estão atualmente ganhando ímpeto sem precedentes, e até mesmo vários casos reais de navios podem mostrar o sucesso do uso de uma ou de múltiplas fontes de energias YANG et al. [15].

Por outro lado, energia eólica ou energia solar não são vislumbrados como possíveis aplicações nos navios militares em virtude que suas instalações poderiam contribuir negativamente em relação à estabilidade das embarcações e em relação à seção reta radar.

Em termos de melhoria de desempenho, os processos de geração de energia podem ser otimizados de modo que haja melhor aproveitamento de combustível e redução de tempo de operação das unidades geradoras.

A necessidade de sistemas *offshore* mais eficientes, juntamente com motivações para a exploração de tecnologias, têm sido o incentivo para transformar todos os subsistemas de energia a bordo em opções mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, a gestão ótima de energia está se tornando de grande importância nesses sistemas devido ao seu impacto direto no aumento da eficiência dos navios. Com estratégia de gestão de energia ótima, o melhor de cada unidade pode ser aproveitado e distribuído. No entanto, fornecimento confiável de energia elétrica é essencial em qualquer sistema a bordo de um navio, como exemplo, em aplicação para navios-sonda¹ com posicionamento dinâmico (DP), onde acionamentos de velocidade variá-

¹navios utilizados para perfuração de poços e extração de petróleo.

vel são empregados para a propulsão e sistemas de perfuração do navio, o que leva à necessidade de fonte de energia confiável para a operação bem-sucedida. Por esses motivos, o uso de sistema de armazenamento de energia é uma das soluções mais eficazes para garantir confiabilidade e qualidade de energia de sistemas elétricos de navios e favorece maior penetração de outros meios de geração distribuída. Além disso, o ESS pode contribuir muito para a gestão da demanda de carga e, em geral, para a gestão global de energia do navio, com possível redução de motores primários, o que por sua vez reduz os custos de operação ANVARI-MOGHADDAM et al. [16].

Nos últimos dois séculos, a aplicação de energia confiável, barata e limpa nas atividades produtivas era vista como ponto chave para promover a prosperidade social e o crescimento econômico. A partir do início do século 21, a utilização de energia sustentável no transporte marítimo tornou-se tendência dominante na indústria de transporte. Com crescente preocupação ambiental, o uso de baterias, GNL, supercapacitores e energias renováveis em navios foram amplamente estudados e alcançaram sucesso nos últimos anos YANG et al. [15].

Sistemas elétricos marítimos são tipicamente projetados para fornecer energia para propulsão, bem como para ampla gama de equipamentos e sistemas auxiliares a bordo da embarcação. No geral, a configuração do sistema elétrico em um navio depende de muitos fatores, incluindo o tamanho da embarcação, sistema de propulsão e perfil da missão, bem como as cargas elétricas específicas e equipamentos a bordo.

Atualmente, pesquisas mostram grande potencial do sistema de captura e armazenamento de carbono (CCS) baseado em terra no controle das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, quando se trata de aplicações a bordo de navios, a integração do CCS torna-se bastante complicada devido às condições operacionais muito limitadas a bordo, especialmente pela escassez de fornecimento de energia FANG et al. [17].

Embora a vantagem mais importante das fontes de energia renováveis seja a mitigação do uso de hidrocarbonetos para geração de eletricidade e, portanto, das emissões poluentes, a situação é pior em termos de independência energética e qualidade de energia quando a geração distribuída e as energias renováveis se combinam. Para lidar com esse problema, o uso de tecnologias de armazenamento apropriadas pode ser solução confiável BOICEA [18].

2.1 Sistema de armazenamento de energia

Conforme BOICEA [18], há alguns tipos de sistema de armazenamento que são aplicáveis para sistemas de energia elétrica, dentre eles, estão: *Battery Energy Storage System* (BESS), *Supercapacitor Storage Systems* (SSS), *Flywheel Storage Sys-*

tems (FSS), *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES), *Pumped Hydrostorage and Compressed Air Energy Storage* (CAES).

Entre todos os sistemas de armazenamento de energia, o BESS é o mais utilizado e possui grande número de tipos, como bateria de chumbo-ácido, bateria de íon de lítio, bateria de NiCd/NiMH e bateria de sódio-enxofre BOICEA [18]. Também há vantagens na aplicação de veículos elétricos, por exemplo, com uso de baterias lítio-íon que interagem com *smart grids* (SG) e, assim, resulta em melhora de qualidade da energia na rede, enquanto que a quantidade de poluentes NO_x e CO₂ será reduzida em nível relevante BOICEA [18].

Por outro lado, existem casos em que os BESS são necessários quando o consumidor está conectado à rede principal. Geralmente, a escolha do tipo e capacidade de tal sistema é feita com base em custos, nível de potência de curto-circuito e resposta à demanda. Por exemplo, a operação de um gerador movido a gás ou uma turbina a vapor pode ser cara quando não há um elemento de armazenamento na rede. Isso ocorre porque o gerador funciona com capacidade menor ou maior, dependendo das necessidades, e isso resulta em maior consumo de combustível, variações de tensão, bem como baixa eficiência do gerador. A solução para este problema pode residir em aplicação de sistema de armazenamento de baixa capacidade. O nível de potência de curto-circuito em determinado ponto da rede influencia diretamente a robustez da rede. Esse problema é muito comum no caso de parques eólicos com geradores de indução de gaiola de esquilo conectados diretamente à rede principal. Nesta situação, a regulação de tensão no ponto de conexão comum (PCC) não é eficiente e, assim, as variações de tensão no PCC podem ser importantes. Neste caso, a rede é fraca e uma solução seria a adoção de um elemento de armazenamento. BOICEA [18]

Para BESS do tipo lítio-íon, segundo BOICEA [18], em seu princípio básico de funcionamento, os íons de lítio positivos migram da placa negativa (geralmente feita de grafite) para a placa positiva (feita de uma liga contendo lítio) durante a descarga e na direção reversa durante o carregamento. O eletrólito permite a circulação de íons, mas não a condução de elétrons. O eletrólito é aprótico (não aceita nem doa íons de hidrogênio) ou não aquoso devido à alta reatividade do lítio com a água.

Com relação a benefícios gerados pela aplicação sistema de armazenamento de energia, há não apenas redução do consumo de energia, mas também estabilização da tensão da linha e redução da potência de entrada no período de maior demanda, resultando em menores perdas nas linhas elétricas TEYMOURFAR *et al.* [19].

Apesar dos benefícios do uso de sistemas de energia híbrida, há aumento da complexidade de projeto. Como marítimo possui boa possibilidade de ocorrência de fenômenos meteorológicos que comprometem a segurança da navegação, navios, que adotam um novo sistema de energia, terão requisitos mais elevados de confiabilidade

de segurança de embarcações em viagem. Deve haver considerações de projeto com inclusão de características das diferentes fontes de energia para responder rapidamente à demanda de carga, maximizar a eficiência operacional e garantir a segurança do navio sob diferentes condições de operação YANG et al. [20].

2.2 Configuração de sistemas de energia convencionais em navios

Microrrede é um grupo de cargas interconectadas e recursos de energia distribuída que podem atuar como uma única entidade controlável e conectar e desconectar da rede para operar em um modo conectado à rede ou isolado RAHMANI-ANDEBILI [21].

Em geral, as microrredes a bordo de navios são compostas por quatro componentes principais: geradores, quadros de distribuição, painéis de distribuição e cargas. Os geradores normalmente são acionados por motores a diesel ou turbinas a gás e fornecem energia elétrica para a embarcação. Os quadros de distribuição são usados para distribuição de energia para os painéis de distribuição, os quais são usados para alimentação das cargas elétricas individuais, como iluminação, ar-condicionado, motores, bombas e sistemas de navegação.

A configuração do sistema elétrico é tipicamente projetada para garantir redundância e confiabilidade, com múltiplos geradores e caminhos de distribuição para assegurar que sistemas críticos possam ser alimentados mesmo no caso de falha em um ou mais componentes. Além disso, os sistemas elétricos marítimos devem atender rigorosos requisitos de segurança para prevenir choques elétricos e riscos de incêndio, o que pode ser particularmente desafiador dada a severa condição do ambiente marítimo.

Sistemas elétricos marítimos modernos frequentemente incorporam tecnologias complexas, como sistemas de controle digital, sistemas de gerenciamento de energia e sistemas de armazenamento de energia, para otimizar o desempenho e a eficiência. Por exemplo, sistemas de armazenamento de energia podem ser usados para fornecer energia de reserva no caso de falha do gerador ou para reduzir o uso do gerador durante os períodos de demanda máxima, melhorando a eficiência de operação do motor e reduzindo-se consumo de combustível e emissões.

Apesar da configuração confiável do sistema elétrico com boa quantidade de fontes de energia, de haver ramos de interconexão entre geradores que assegura disponibilidade de energia e alto grau de redundância, o sistema elétrico de um navio convencional possui algumas diferenças em relação navios com integração de outros tipos de geração de energia e de armazenamento. Porém, no caso de navios de com-

bate com sistema de geração de energia convencional, não são observadas deficiências ou vulnerabilidades em relação a controle de sistemas, sistema de gerenciamento de energia e critério de projeto em redundância.

Com relação à decisão da configuração do sistema elétrico a bordo de um navio, a redução de custo com combustível alcançada por meio de sistemas elétricos híbridos pode ser não relevante em comparação com o custo total de operação, em virtude do aumento de intervenções para manutenção, e tornar a configuração convencional a escolha mais adequada.

2.3 Configuração de sistemas de energia com armazenamento

A configuração de sistemas elétricos a bordo de navios que possui bom número de casos de aplicação é apresentada na Figura 2.1, a qual mostra arranjo entre equipamentos conectados ao sistema elétrico, inclusive com aproveitamento de operação do motor de propulsão, por meio de gerador² acoplado ao sistema de propulsão, onde é gerada energia elétrica para alimentação de cargas e armazenamento de energia.

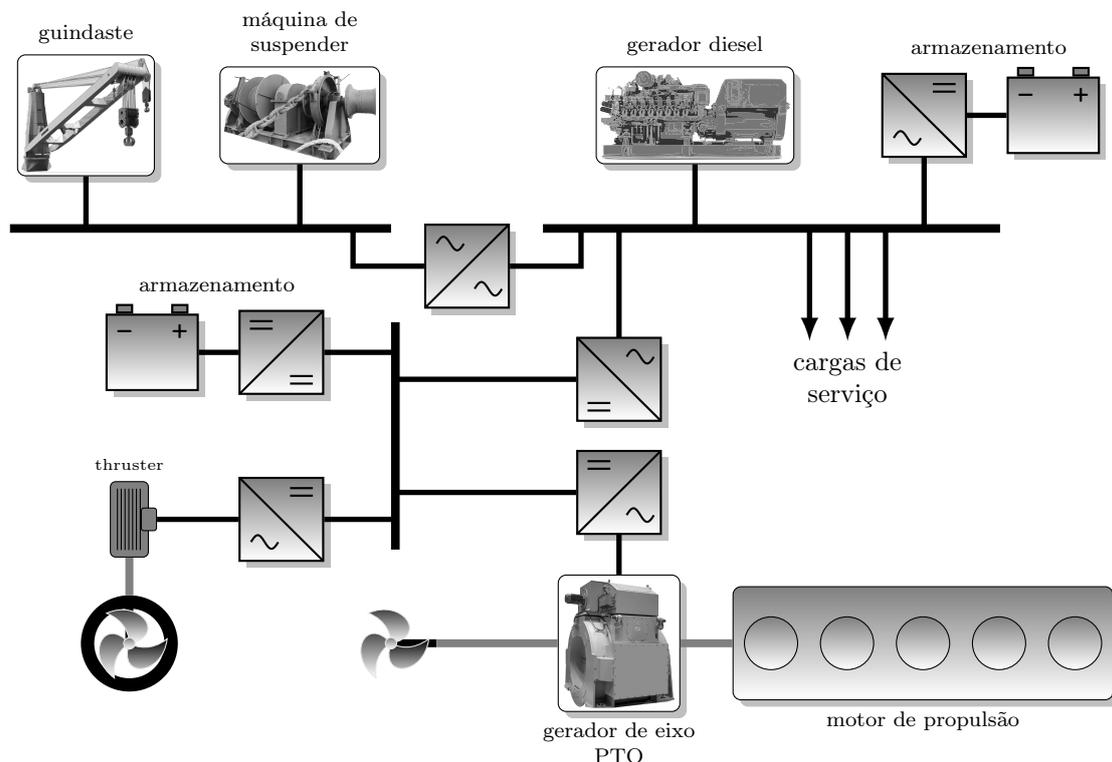


Figura 2.1: configuração de sistema elétrico híbrido com *power take-off* (PTO) e sistema de armazenamento.

²gerador para aproveitamento de potência excedente da propulsão (*power take-off*).

Por gerar modificação apenas na inclusão de sistema de armazenamento de energia e baixa alteração em relação à atual topologia de embarcações de alto grau de importância nas ações de defesa naval, a configuração que poderia ser utilizada a bordo de navios, para uso militar, possui sistema elétrico semelhante ao apresentado na Figura 2.2, na qual, o sistema elétrico possui duas estações de geração de energia, com dois geradores e um quadro elétrico cada uma. Além disso, não haveria contribuição adicional de curto-circuito do sistema de armazenamento, em virtude de controle de corrente. Portanto, não haveria alteração da configuração de proteção dos quadros elétricos.

Por outro lado, geralmente, a demanda de potência é atendida por uma estação geradora somente, visto que os requisitos de concepção dos meios navais são rígidos e repletos de restrições de redundância para garantir menor possibilidade de contingência devido a falhas do sistema elétrico nas missões militares.

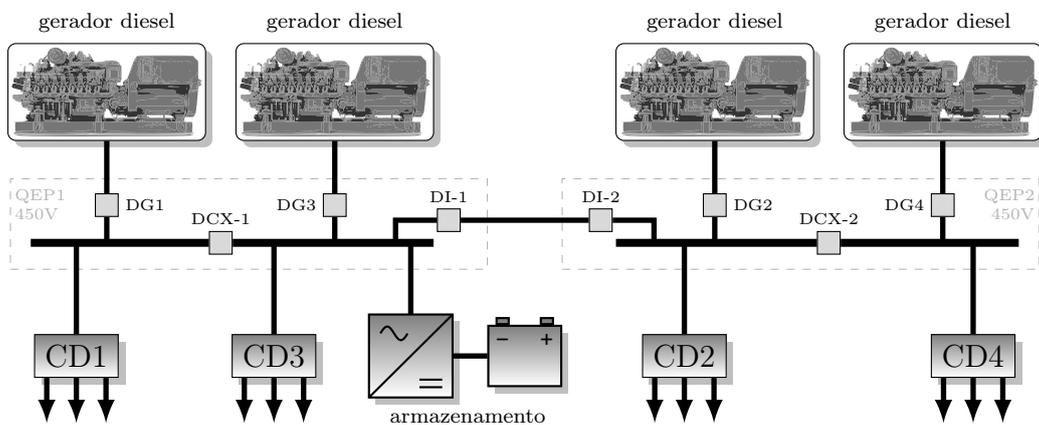


Figura 2.2: diagrama de configuração provável de planta elétrica com sistema de armazenamento para aplicação futura em navios militares.

Outras aplicações são concebidas para operação em conjunto com cargas de propulsão. Os motores demandam alto valor de potência com taxas de variação de potência bastante elevadas. Para minimizar efeitos de redução da tensão da rede e responder à demanda de potência em transições de velocidade da embarcação com relativa rapidez, são aplicados sistemas de armazenamento. A Figura 2.3 mostra arranjo dessa configuração.

Por outro lado, boa parte das aplicações com propulsão integrada à rede elétrica é concebida com média tensão, condição que requereria ampliação de instrução profissional dos operadores para trabalho com nível de tensão elevado nas organizações proprietárias de embarcações.

Ainda sobre a tensão utilizada nas microrredes de bordo, destaca-se a topologia com tensão CC ou com barramentos de CC e de CA em conjunto. A Figura 2.4 apresenta configuração com todos os componentes ligados por meio de conversores ao barramento CC comum de uma microrrede.

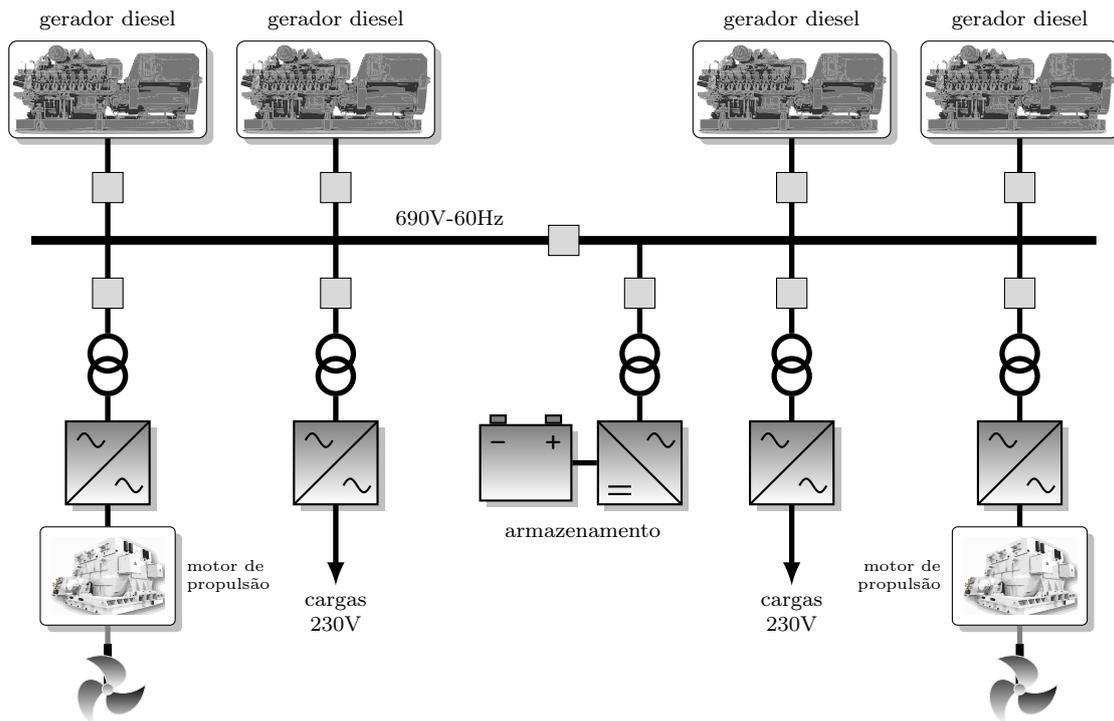


Figura 2.3: microrrede de navio com geradores diesel combinado com sistema de armazenamento com propulsão integrada (adaptado de MUTARRAF et al. [2]).

Essa combinação inclui componentes e módulos típicos de um sistema híbrido. Células a combustível e energia solar são fontes de energia limpa propostas para embarcações mais eficientes em termos de consumo de combustível. Além disso, excetuando-se navios de combate, pode haver aplicação de energia solar, usando velas fixas equipadas com painéis solares, com energia eólica e armazenamento de energia a bordo de um navio totalmente elétrico, o qual pode ser baseado em diferentes tecnologias, como baterias e supercapacitores eletroquímicos, que se constitui como configuração para redução de emissão de poluentes ZAHEDI e NORUM [3].

As redes de energia híbridas oferecem flexibilidade. Ao contrário de uma rede convencional de distribuição de energia, ou seja, uma rede elétrica, uma rede de gás natural ou uma rede de aquecimento distrital, que opera independentemente de outras, uma rede de energia híbrida consiste em múltiplas fontes de energia entre, as quais, é possível a conversão. Quando uma das fontes de energia se torna indisponível, as redes de energia híbrida introduzem capacidade de se adaptar, pela conversão local ou central, de forma disponível de energia para fonte de energia necessária. Quando a conversão local é possível, as redes de energia híbrida também introduzem a capacidade de selecionar uma fonte específica de energia, independente da natureza de energia produzida ou da forma de energia requerida MAZAIRAC et al. [22].

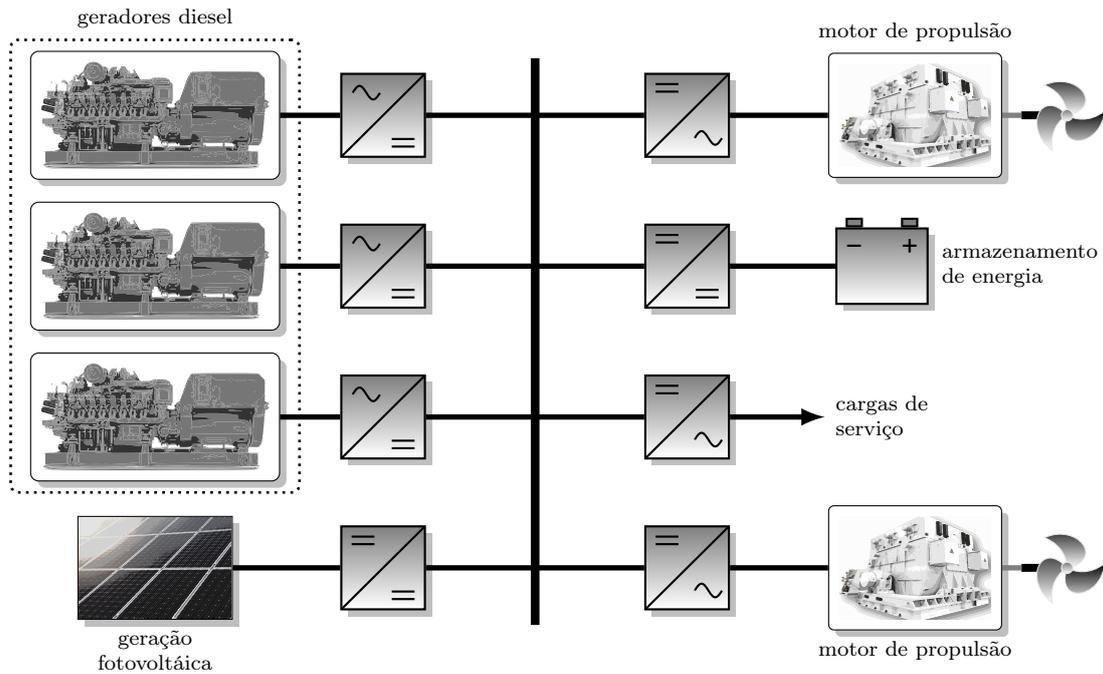


Figura 2.4: microrrede com geradores diesel, sistema de armazenamento e geração fotovoltaica integrados com propulsão e demais cargas com conexão feita por meio de barramento de corrente contínua (adaptado de ZAHEDI e NORUM [3]).

2.4 Considerações sobre emissões

De acordo com FABER et al. [7], as emissões por hora para cada sistema, dentre eles, motores de propulsão, motores de geração de energia e aquecimento, caso haja, são divididas em dois grupos, pela forma de cálculo de emissões, efetuado por meio de fatores de emissão com base em potência dos equipamentos e em consumo das máquinas.

Considerando os valores de consumo de combustível e potência dos geradores, são calculados, os níveis de emissão por hora (EM_i), de gás carbônico (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e outros poluentes que podem ser emitidos na operação dos motores a combustão, por meios de equações, expressas por

$$EM_i = EF_e \cdot W_i \quad (2.1)$$

e

$$EM_i = EF_f \cdot FC_i, \quad (2.2)$$

sendo EF_e o fator de emissão por unidade de energia, normalmente por kWh, EF_f é o fator de emissão por massa de combustível, gramas por grama de combustível, W_i a potência demandada no período observado e FC_i é o consumo de combustível

medido.

Ainda conforme FABER *et al.* [7], os fatores de emissão de gases de efeito estufa e demais poluentes usados para cálculo de emissão são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: fatores de emissão de poluentes para óleo diesel marítimo pesado FABER *et al.* [7].

Componente	Fator de emissão ⁽ⁱ⁾	Componente	Fator de emissão ⁽ⁱ⁾
CO ₂	3,114	CO	0,00288
CH ₄	0,00005	SO _x	0,05083
N ₂ O	0,00018	PM ⁽ⁱⁱ⁾	0,00755
NO _x	0,0759	PM _{2.5}	0,00694

⁽ⁱ⁾ g/g de HFO (*heavy fuel oil*)

⁽ⁱⁱ⁾ *particulate matter*

O fator de emissão de CO₂ é o que mais se destaca, por representar alta proporção em relação ao volume de combustível. Por outro lado, demais poluentes estão presentes nos resíduos da operação de motores diesel associados ao sistema de geração de energia a bordo. Por exemplo, PM são resíduos de combustão, PM sem especificação de medida e PM_{2.5} com medida menor que ou igual 2,5 μm, é um material particulado fino presente em alguns aerossóis. Esse tipo de partícula possui tamanho microscópico, por isso, quando liberado no ar, pode entrar facilmente nas vias respiratórias, condição que causa problemas como asma, pneumonia e câncer de pulmão COELHO e CORRÊA [23].

2.5 Abordagens de gerenciamento de sistemas de energia

2.5.1 Despacho econômico

Despacho econômico é um tipo de otimização em sistemas elétricos cujo objetivo é reduzir o valor de função de custo de operação de unidades geradoras de energia. No caso de geradores diesel, o consumo de combustível é função do consumo específico de combustível multiplicado pela potência despachada em determinado período.

Sendo o consumo específico de combustível expresso por meio de função da potência, a minimização de consumo de combustível poderá ser obtida por meio de algumas técnicas de otimização usuais. Por outro lado, as funções de consumo específico de combustível são expressas como funções não lineares e carecem de uso de programação não linear ou métodos heurísticos.

2.5.2 *Unit Commitment*

Os problemas *unit commitment* (UC) são bem conhecidos na indústria de energia e têm o potencial de economizar milhões de dólares por ano em combustível e custos relacionados. É uma área de programação de produção que se relaciona com a determinação do status ligado/desligado das unidades geradoras durante cada intervalo do período programado, para atender às exigências de carga do sistema e reservas e ao custo mínimo, que estão sujeitos à disponibilidade de equipamentos, restrições do sistema e ambientais. O problema UC é um processo de tomada de decisão complexo e é difícil desenvolver quaisquer métodos rigorosos de otimização matemática capazes de resolver o problema por completo para qualquer sistema de tamanho real ABOOKAZEMI e MUSTAFA [24].

Para CHANG et al. [25], o propósito do UC é minimizar o custo total de geração enquanto atende à demanda do sistema, requisitos de reserva e outras restrições da unidade. As instalações com UC têm sido cada vez mais instaladas em todo o mundo devido à sua alta eficiência e rápida resposta.

Já para ABOOKAZEMI e MUSTAFA [24], o objetivo do problema de UC é a minimização dos custos totais de produção durante o período programado. Os custos totais consistem em: custos de combustível, custos de inicialização e custos de desligamento.

Com o aumento da taxa de penetração de energia eólica na grande rede elétrica, é de grande importância analisar o impacto da energia eólica no UC do sistema de energia e despacho econômico. No problema de UC com restrições de segurança, a introdução da turbina eólica pode reduzir o custo operacional das unidades de energia térmica e melhorar a economia da operação do sistema. Como o sistema de armazenamento de energia tem características de regulação bidirecional rápida, ele pode melhorar a capacidade da rede elétrica de absorver energia eólica e a economia da operação do sistema XI et al. [26].

O UC é um modelo importante no sistema de energia para programar de modo otimizado os recursos geradores ao longo de um horizonte de tempo, considerando mudanças de carga e vários outros fatores. UC é um problema não convexo, que também é discreto. Desde o início da formulação UC, muitas pesquisas exploraram diferentes caminhos para formular o UC como um problema de programação linear inteira mista sem restrições DIPAN BISWAS et al. [27]

De acordo com HAN et al. [28], o problema de UC, que é usado para agendar a operação de unidades geradoras, desempenha um papel importante na operação ótima dos sistemas de energia. O objetivo do problema de UC é minimizar o custo total de operação das unidades geradoras ao longo do horizonte de tempo programado, ao mesmo tempo em que atende às demandas e requisitos de reserva, bem

como às restrições das unidades geradoras. Por várias décadas, o problema de UC tem sido um tópico de pesquisa ativo devido às economias potenciais nos custos de operação .

2.5.3 *Demand Side Management*

O esforço mundial pelo desenvolvimento de navios mais eficientes e ecologicamente corretos levou ao surgimento de novos conceitos. Juntamente com gestão de energia otimizada, pode levar à melhoria significativa na eficiência dos navios, garantindo-se, ao mesmo tempo, conformidade com as restrições ambientais e aprimoramento da sustentabilidade do navio KANELLOS et al. [29].

Segundo PREMKUMAR et al. [30], *Demand Side Management* (DSM) é um conjunto de tecnologias reunidas para alcançar um objetivo comum: oferecer energia confiável e de menor custo ao longo do tempo. O DSM integra duas ideias principais para alcançar o equilíbrio entre oferta e demanda, o deslocamento de carga e a eficiência energética. Programas de resposta à demanda, que tentam deslocar as cargas dos horários de pico para os horários fora de pico, são um método de deslocamento de carga.

O sistema de gestão de microrredes é uma forma de controlar efetivamente a alta inserção de recursos de energia distribuída nas redes. WYNN et al. [31] descreve que a estratégia seria gerenciar a produção local de energia, aumentar o uso de energia renovável para reduzir o consumo de geração baseada em combustível e considerar o alívio da demanda em períodos de pico de demanda, tanto para o modo conectado à rede quanto para o modo isolado.

Navios tradicionais, como *auto export shipping* (AES), devem empregar plano de gestão de eficiência de energia de navios bem projetado em futuro próximo. Os principais objetivos do referido plano, os quais são minimização de custo operacional e limitação das emissões de gases, podem entrar em conflito entre si, o que torna a gestão ótima de energia em AES um problema desafiador e complexo KANELLOS et al. [29].

Apesar de ser abordagem com bons resultados descritos em alguns estudos, sua aplicação não seria adequada aos navios militares em virtude de resultar em mudanças operacionais importantes nas embarcações, as quais provocariam degradação do desempenho e comprometeriam a capacidade de combate nas missões navais.

2.6 Algumas Técnicas de Otimização de Sistemas de Energia

2.6.1 Programação Linear (LP)

Programação linear é uma técnica de otimização bastante comum para minimizar ou maximizar função objetivo linear sujeita a restrições de igualdade e de desigualdade. LP é frequentemente utilizada em otimização de sistemas de potência para despacho econômico e *unit commitment* KHAN [4].

As formulações de gerenciamento e de operação de sistemas de energia, em boa parte, são compatíveis com problemas de programação linear. A forma geral de um problema de programação linear segue o modelo

$$\begin{aligned} \text{Min } & \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.a. } & \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0, \end{aligned} \tag{2.3}$$

sendo \mathbf{c} , o vetor de coeficientes da função objetivo, \mathbf{x} , o vetor de variáveis de otimização, \mathbf{A} e \mathbf{b} , a matriz e o vetor de restrições.

O método *simplex* se constitui como o mais consolidado para a resolução de modelos de otimização em programação linear LUENBERGER e YE [32].

2.6.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

A PSO é a famosa técnica de otimização criada por J. Kennedy e R. Eberhart em 1995. Eles se inspiraram no comportamento social de agrupamento de pássaros. A técnica PSO é considerada ter menos parâmetros do que um algoritmo genético básico KERDPHOL *et al.* [33].

Para IGNAT *et al.* [34], PSO é um algoritmo estocástico de busca baseado em população inspirado no comportamento natural do agrupamento de pássaros ou cardumes de peixes em busca de alimento. Semelhante a outros algoritmos de busca meta-heurística, o PSO começa com uma população gerada aleatoriamente de possíveis soluções e idealmente converge para a solução ótima global do problema. Diferentemente de outras técnicas de otimização, o PSO adapta cada uma de suas possíveis soluções com base em seu melhor resultado, bem como no melhor resultado geral de toda a população. Os parâmetros utilizados para gerar novas soluções variam de acordo com a versão do algoritmo.

O algoritmo PSO emula o comportamento de animais em sua busca por comida. O bando de pássaros ou cardume de peixes é representado pelo enxame, com cada partícula assumindo o papel de um indivíduo. A função objetivo representa a fonte

de alimento. A dimensão do problema é dada pelo número de variáveis de decisão. Em sua busca por comida, os animais adaptam sua posição individualmente e coletivamente. Portanto, no processo de otimização, tanto a melhor posição da partícula quanto a melhor posição de todo o enxame são levadas em consideração ao gerar novas soluções possíveis. O algoritmo começa com um enxame inicial de partículas geradas aleatoriamente dentro do espaço de busca. As partículas são inicializadas com uma posição e uma velocidade aleatórias IGNAT et al. [34].

De acordo com LITCHY e NEHRIR [35], complementado por ZHANG et al. [36], o modelo de evolução dos membros, ou partículas, da população é expresso por

$$V_{i,d}^{(k+1)} = w_J \cdot V_{i,d}^{(k)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{i,d}^b - X_{i,d}^{(k)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_d^b - X_{i,d}^{(k)}) \quad (2.4)$$

e

$$X_{i,d}^{(k+1)} = X_{i,d}^{(k)} + V_{i,d}^{(k+1)}, \quad (2.5)$$

sendo k , indicação da iteração, $V_{i,d}$, velocidade de alteração da posição do indivíduo i , $P_{i,d}^b$, posição correspondente com o melhor valor da função objetivo alcançado pelo indivíduo i no decorrer das iterações, P_d^b , posição correspondente com o melhor valor da função objetivo alcançado dentre todos os indivíduos no decorrer das iterações, $X_{i,d}$, vetor de posição do indivíduo i com dimensão d , c_1 e c_2 são fatores de aprendizado, sendo usual escolha por $c_1 = c_2 = 2$, r_1 e r_2 são valores randômicos no intervalo $[0, 1]$ e w_J representa a fator de inércia de velocidade do modelo.

Nos problemas de otimização, $X_{i,d}$ corresponde à posição do indivíduo i representada pelo vetor de todas as variáveis consideradas. Para aplicação em gerenciamento de potência de microrredes, os vetores $X_{i,d}$ são compostos por todas as variáveis do problema, isto é, d variáveis, sendo elas, as potências das fontes de energia, variáveis de estado de operação, estado de carga do armazenamento, caso haja, etc, de acordo com o modelo de projeto. Para MAULIK e DAS [37], a técnica PSO atua como uma ligação entre a rede elétrica e as equações no domínio do tempo.

2.6.3 Programação Linear Inteira Mista (MILP)

O problema de operação da microrrede é definido como a gestão ótima de energia e o agendamento dos recursos energéticos disponíveis da microrrede (várias unidades de armazenamento de energia, rede elétrica local, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, etc.) para fornecer a demanda elétrica da microrrede, com minimização do custo geral de operação dos recursos ao longo do horizonte de tempo especificado RAHMANI-ANDEBILI [21].

Os benefícios de mercado de implementar MILP para resolver as necessidades

de UC precisam ser enfatizados. Ao longo das últimas décadas, vários métodos foram desenvolvidos para criar formulações e métodos de solução eficientes para o problema UC. A versão de programação linear inteira mista tornou-se tecnologia bem estabelecida na indústria para modelar problemas de UC. No mercado real, as soluções para o problema UC são obtidas para milhares de unidades geradoras e sistemas de transmissão que possuem milhares de barras e conexão entre diferentes linhas de transmissão. Esta implementação resultou da necessidade de manter regularidade com operações de mercado em tempo real, modelando redes de transmissão complexas. Alguns benefícios do MILP são otimalidade, qualidade da solução e adaptabilidade do problema. Além disso, *solvers* MILP prontos para uso (por exemplo, CPLEX, Gurobi) contribuem para a adoção de modelos MILP UC na indústria SAVASCI et al. [38].

Uma formulação de problema de programação linear inteira mista pode ser ilustrada como

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.a} \quad & h(\mathbf{x}, \mathbf{y}) < b \\ & g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = c, \end{aligned} \tag{2.6}$$

sendo \mathbf{x} vetor de variáveis contínuas, \mathbf{y} vetor de variáveis inteiras, f e g funções lineares, e b e c vetores de valores reais.

O método de programação linear baseia-se na otimização de uma função objetivo linear, sujeita a restrições de igualdade e desigualdade lineares, o que significa que as equações não lineares precisam ser linearizadas MAZAIRAC et al. [22].

2.6.4 Programação Não Linear Inteira Mista (MINLP)

Problemas de programação não linear com variáveis mistas basicamente envolvem restrições gerais e funções objetivo com variáveis contínuas e inteiras. Muitos problemas de engenharia são formulados como um problema MINLP, que agrega a natureza combinatória da programação de variáveis mistas com as dificuldades da programação não linear WANG e TSAI [39].

Segundo DURAN e GROSSMANN [40] e NOWAK [41], um MINLP pode ser representado por

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.a} \quad & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \\ & \mathbf{x} \in X \subset R^n \\ & \mathbf{y} \in Y \subset R^m, y_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \tag{2.7}$$

sendo $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ e $\mathbf{g} : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^p$, $\mathbf{h} : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^q$, funções não lineares, \mathbf{x} vetor de variáveis contínuas e \mathbf{y} vetor de variáveis inteiras.

Com o crescente uso da modelagem de problemas de otimização em questões práticas, várias contribuições teóricas e algorítmicas para MINLP têm sido propostas. No entanto, a maioria dos problemas de otimização em engenharia frequentemente inclui funções não convexas que não podem ser tratadas pelas técnicas padrão de otimização local para garantir a otimalidade global WANG e TSAI [39].

Comparado com o MILP, o uso da programação não linear para modelar o problema de expansão da microrrede terá dois impactos principais nos resultados: (1) otimalidade da solução, pois modelos de programação não linear podem ficar presos em uma solução ótima local e nunca atingir a solução ótima global, o que não ocorre em modelos de programação linear; (2) tempo de solução, os modelos de programação não linear têm um tempo de cálculo superior em comparação com os modelos de programação linear, especialmente quando variáveis binárias são introduzidas no problema, o que ocorre na formulação de expansão de microrredes ALSAIDAN *et al.* [42].

A pesquisa em otimização atraiu atenção mundial quando avanços significativos foram feitos na programação linear no final da década de 1940. Motivados por aplicações, os desenvolvimentos em programação não linear seguiram rapidamente, e diversas abordagens foram desenvolvidas para resolver extensa variedade de problemas de otimização global contínua e inteira. No entanto, resolver problemas gerais de programação não linear com variáveis mistas ainda tem sido uma tarefa muito difícil. No entanto, problemas de projeto de engenharia, logística, manufatura, ciências químicas e biológicas frequentemente exigem modelagem por meio de variáveis inteiras e MINLP. Os ganhos potenciais a serem obtidos por meio da otimização global desses problemas motivaram esforços recentes, incluindo o desenvolvimento de algoritmos de otimização global determinísticos e estocásticos HAN e YANG [43].

No âmbito de gerenciamento de potência de geradores e na alocação da potência entregue pelo armazenamento, a formulação do problema em MINLP permite que se considere os valores contínuos dessas variáveis, mas também variáveis de otimização binárias, para definição de estado, ligado ou desligado, de geradores diesel ou de dispositivos de armazenamento de energia.

Em geral, as formulações MINLP são de difícil solução por apresentarem característica não convexa, e necessitam de métodos de relaxação e divisão em partes como alternativas para obter o mínimo global.

2.7 Trabalhos relacionados com gerenciamento de potências por meio de otimização

Os modelos de gerenciamento de potências apresentam formulações variadas a depender do método de resolução a ser definido, e formulações que poderão ser lineares ou não lineares a depender do *solver* a ser usado.

No caso apresentado por BOVERI et al. [1], é apresentada formulação para seleção da capacidade do armazenamento por meio de otimização em duas etapas: problema de programação linear inteira mista para o gerenciamento virtual de potências e problema de programação não linear, usando-se profundidade de descarga média, número de ciclos e consumo de combustível provenientes do gerenciamento virtual. Vislumbra-se que o cálculo feito em mais de uma etapa e por possuir característica monetária poderiam representar desvantagens na escolha por esse tipo de abordagem.

Em YAHYAIE e SOONG [44], resolve-se o problema do fluxo de potência ótimo (OPF) para um sistema elétrico com BESS. O problema de otimização também é estendido para minimizar a capacidade do BESS. Restrições adicionais são incluídas para garantir que a energia líquida da bateria ao longo de um ciclo de operação seja zero. Descobre-se que o custo de um BESS baseado apenas em nivelamento de carga não pode ser justificado. Um BESS também deve ser empregado em sistemas com variações de carga mais elevadas e diferentes tipos de geradores. O dimensionamento ótimo é realizado considerando-se que apenas uma parte do custo do BESS deve estar associada aos benefícios do nivelamento de carga.

No caso de LAI e ILLINDALA [45], é proposta estratégia de planejamento para dimensionamento e localização de configuração especial de integração de ESS, o ESS distribuído em nuvem (DCESS), em sistemas elétricos para navios, *shipboard power systems* (SPS). Enquanto o objetivo do dimensionamento do DCESS é minimizar o custo total do SPS, o objetivo da localização do DCESS é aumentar a resiliência do SPS. Por meio de programação estocástica, a solução ótima em relação às condições operacionais representativas e cenários de falha é obtida. A configuração DCESS proposta facilitaria a troca de energia entre as zonas elétricas. Uma comparação com a configuração ESS convencional é apresentada e a vantagem da configuração DCESS no aumento da resiliência é demonstrada.

Já em BHUJADE et al. [46], é apresentada formulação não linear baseada em consumo de combustível de geradores diesel e estado operacional de desempenho de baterias, com minimização multiobjetivo, onde aborda a seleção do tipo e da capacidade do sistema de armazenamento de energia para um sistema elétrico de potência de navio. Primeiramente, a estratégia operacional ótima baseada em uma função de custo multiobjetivo para diferentes combinações de sistemas de armazenamento

é formulada. Em segundo lugar, os sistemas de armazenamento de energia mais adequados são determinados comparando-se parâmetros como consumo de combustível, custo de capital, custo de reposição e capacidade para ciclo operacional alvo de 5 anos. Os resultados mostram que um sistema de armazenamento de energia não apenas reduz o consumo de combustível, mas também restringe a operação dos geradores além de seus limites operacionais normais.

Para BAO et al. [47], é proposto um método para determinação da capacidade ótima de um sistema de armazenamento de energia para um *ferry* marítimo, com geradores a diesel e painéis fotovoltaicos. A otimização do dimensionamento dos ESS e a otimização da programação do sistema de energia são conduzidas simultaneamente e são convertidas em um modelo de programação quadrática inteira mista (MIQP) com técnicas de modelagem especiais. O estudo de caso mostra que o método proposto é flexível e eficaz, e as relações entre a capacidade dos ESS e a taxa de descarga, tempos de ciclo de vida ou custo de investimento inicial são investigadas.

Segundo ANVARI-MOGHADDAM et al. [16], a gestão de energia da próxima geração em todas as escalas depende fortemente da programação e operação eficiente de diferentes fontes de energia para maximizar eficiência e utilidade. A capacidade de programar e modular as opções de armazenamento de energia dentro dos sistemas de energia também pode levar a uso mais eficiente das unidades geradoras. Essa estratégia de gestão e planejamento ótimo torna-se cada vez mais importante para sistemas *off-grid* que operam independentemente da rede, como microrredes ou sistemas de energia em embarcações marítimas. No trabalho dos referidos autores, são apresentados princípios de planejamento ótimo e problemas de despacho econômico para sistemas embarcados, onde alguns meios de geração e armazenamento também são programáveis. Primeiro, aborda-se a questão de instalação ou não do armazenamento e seu dimensionamento, com otimização da potência do armazenamento e sua capacidade. Em seguida, a estratégia operacional ótima para o plano proposto é derivada com base na solução de um MINLP. Os resultados da simulação mostram que incluir opções de armazenamento de energia bem dimensionadas, juntamente com a gestão operacional ótima das unidades geradoras, pode melhorar a operação econômica do sistema de teste enquanto atende às restrições do sistema.

Em ZHANG et al. [36], é proposta estratégia de gerenciamento de energia que é usada para *scheduling* diário ou de curto prazo de acordo com múltiplas escalas de tempo. O agendamento diário é baseado na otimização por PSO para minimização multiobjetivo, a fim de garantir economia e estabilidade de uma microrrede. No entanto, devido à divergência na previsão diária, utiliza modo de otimização contínua para corrigir a divergência e garantir a eficácia da previsão diária.

UDALOV et al. [48] apresenta metodologia de dimensionamento e estratégia operacional ótima para um BESS, de modo a fornecer *peak shaving* na demanda

mais alta. A metodologia de dimensionamento é usada para maximizar o benefício econômico do cliente, reduzindo o pagamento da demanda de potência com um BESS de capacidade mínima, ou seja, um sistema com o menor custo. A estratégia operacional ótima do BESS é baseada em programação dinâmica e visa minimizar o custo da energia enquanto atende às restrições físicas da bateria.

2.8 Conclusões parciais

Os níveis de emissão de poluentes provenientes de geração de energia a bordo de navios tendem a serem reduzidos devido a ações motivadas pelos acordos internacionais constituídos com base nos documentos pela organização marítima internacional.

Apesar dos estudos de emissão serem feitos para navios de uso comercial, vislumbra-se que a provável condição de sucesso quanto à redução de emissões dos navios não militares, provocarão ações de redução de emissões para navios de outros ramos de atuação para emprego das forças navais.

As abordagens de otimização para contribuir com eficiência de energia a bordo de navios são bastante robustas e mostram resultados importantes do ponto de vista de tempo de operação de unidades geradoras e consumo de combustível.

Como visto nas referências, o volume de trabalhos publicados que tratam to assunto de otimização com efeito no nível de emissões é volumoso e o potencial das técnicas apresentadas é relevante e poderá ser realidade para a maioria dos navios, inclusive os de forças navais, até 2050. Boa parte das referências utiliza programação linear inteira mista ou programação não linear inteira mista ou *particle swarm optimization* como métodos de resolução de gerenciamento de potências.

Para as formulações elaboradas neste trabalho, o uso de métodos de resolução de MILP e MINLP são considerados satisfatórios como mostram os capítulos posteriores.

Capítulo 3

Dimensionamento do armazenamento

Nos capítulos anteriores, são apresentadas considerações sobre redes elétricas a bordo de navios, redes elétricas com sistema de armazenamento, alternativas para gerenciamento de sistemas elétricos a bordo de navios, motivação para aplicação de sistemas de armazenamento de energia em microrredes com geradores diesel, além algumas abordagens de otimização de gerenciamento de potência e ferramentas de otimização.

Em microrredes, algumas abordagens de otimização podem ser usadas para a resolução do problema de gerenciamento de potências considerando premissas de operação do sistema. Dentre eles, pode-se listar *unit commitment*, despacho ótimo, *demand side management*, resolvidas por meio de métodos como *particle swarm optimization*, programação linear, programação linear inteira mista e programação não linear inteira mista, os quais são amplamente utilizados. A resposta desses processos são referências de potência de cada fonte de energia da microrrede para determinado período para minimizar ou para maximizar funções de custo ou de rendimento estabelecidas pelo projetista.

Motivada pela experiência de aplicações de sistema de armazenamento para diminuição de impactos negativos devido às incertezas de geração de energia em sistemas de energia renováveis, a importância de armazenamento de energia e de estratégias de gerenciamento de microrredes a bordo de navios é bastante significativa quando se trata da estabilidade da aplicação.

O efeito geralmente desejado é o carregamento do armazenamento em caso de baixa demanda, na busca de melhor rendimento da fonte convencional, geralmente gerador diesel, e descarga do armazenamento quando houver valor superior de demanda de potência na microrrede.

O caso a ser estudado compreende o dimensionamento do armazenamento por meio de otimização do gerenciamento de potências, com minimização de função objetivo que possui parcelas de consumo de combustível, tempo de operação dos geradores diesel e número de partidas dos geradores, além da capacidade do arma-

zenamento. O resultado se constitui de gerenciamento virtual da microrrede, ou seja, os perfis de potência dos geradores e do armazenamento, bem como, seus estados e comandos de partida e de parada, e obtenção da capacidade do sistema de armazenamento de energia.

Apesar da configuração de sistemas elétricos a bordo de navios apresentada até aqui seja composta por duas estações com dois geradores cada uma, os precedimentos apresentados, daqui por diante, consideram três geradores diesel disponíveis na microrrede. Como se espera inclusão de restrição de operação de no máximo dois geradores simultaneamente, a condição de *unit commitment* pode ser demonstrada com apenas três geradores, além de que a máxima demanda de potência é inferior à capacidade de potência de dois geradores somados. Além disso, a inclusão de mais geradores seria desvantajoso, visto que resultaria em maior tempo de processamento da otimização. Portanto, a configuração definida para o processo de otimização é apresentada na Figura 3.1, que mostra os geradores e o sistema de armazenamento em microrrede, interligados em ponto comum de conexão (PCC).

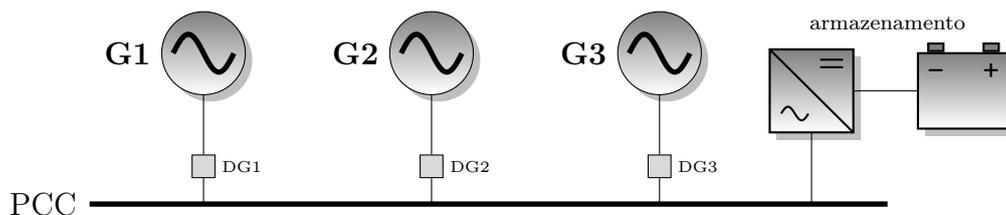


Figura 3.1: configuração da microrrede a ser utilizada na formulação.

Neste capítulo, é proposto gerenciamento de uma microrrede por meio de otimização de problema de programação não linear inteira mista, com o propósito de redução de horas de operação das fontes convencionais de energia, de consumo de combustível, do número de partidas dos geradores e obtenção da capacidade do sistema de armazenamento de energia.

Para modelagem, é feita análise sobre consumo específico de combustível, formulação de gerenciamento de potências com restrições e expressões aplicáveis para uma microrrede formada por geradores diesel combinados com conjunto de baterias, de modo a obter balanço energético otimizado e condição de operação em sintonia com as restrições da microrrede.

3.1 Consumo específico de combustível

Para inclusão de consumo de combustível na formulação, é considerada a curva de consumo específico de combustível apresentada em [BOVERI et al. \[1\]](#), onde é proposto que motores diesel para geração de energia, possuem padrão de consumo

de combustível variado em relação ao seu nível de carregamento. É feita interpolação dos pontos da curva, Figura 3.2, para obtenção do seu modelo para uso na formulação do problema de otimização, em relação a um gerador de 1000 kW de potência nominal.

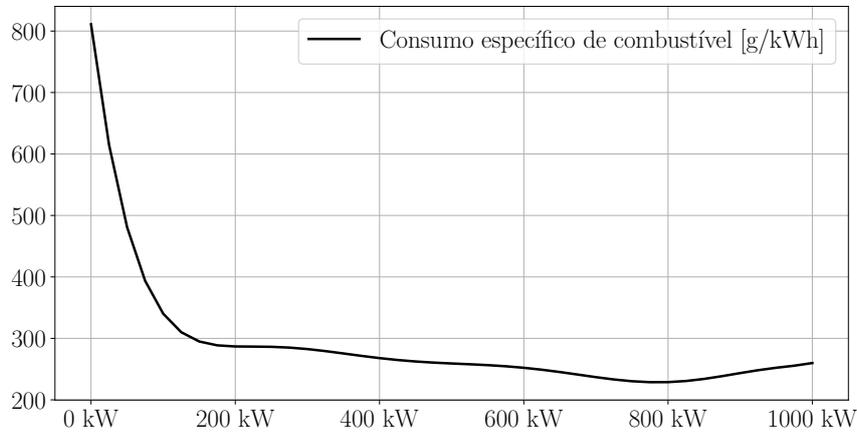


Figura 3.2: curva de consumo específico de combustível por potência demandada de um gerador diesel com potência nominal de 1000 kW (adaptado de BOVERI et al. [1])

Os modelos de curvas provenientes de ensaios são não lineares, geralmente, polinômios de alta ordem, que podem dificultar ou impedir a otimização, e por isso, como alternativa, é aplicada linearização das curvas. Porém, a aplicação de linearização não seria adequada, em virtude de que o problema de otimização deste capítulo é não linear por conta de restrição relacionada com o armazenamento, e que levaria à inclusão de mais variáveis, inteiras e contínuas, e, conseqüentemente, resultaria em aumento do tempo do processo de otimização e redução de possibilidade de alcance da solução do problema.

Nesse contexto, é considerada interpolação polinomial da curva de modo a obter polinômio com grau suficiente para representar os valores de consumo específico de combustível em melhor nível possível, de forma a obter valores de consumo mais próximos do real e evitar sobrecarregamento na resolução do modelo de otimização ou, mesmo, inexequibilidade do problema de otimização. O modelo da curva de consumo específico de combustível pode ser representado como

$$\text{sfoc} (P^{gen}) = \sum_{k=0}^{G_P} m_k \cdot [P^{gen}]^k, \quad (3.1)$$

sendo sfoc, a variável de consumo específico de combustível, m_k , os coeficientes do polinômio correspondente à curva de sfoc e P^{gen} , potência do gerador, e G_P , o grau escolhido para o polinômio.

3.2 Gerenciamento virtual

3.2.1 Função objetivo

A formulação proposta de problema de otimização possui inclusão de função custo, por meio do modelo não linear de uma função típica de consumo específico de combustível, que permite o algoritmo vasculhar, limitada pelos limites operacionais dos geradores, os melhores valores de potências com base no rendimento e demais componentes do objetivo.

A partir do exposto, o objetivo, as condições de operação, as características e as restrições de operação de uma microrrede, são reunidos em um problema de programação não linear inteira mista.

A Equação 3.2 define a função objetivo para o problema de otimização a ser tratado nesse capítulo.

$$\min_x F_{obj}^{ger} = w_{pty} \cdot \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_G} u_{(ij)} \cdot C_{(ij)}^{pty} + w_{stu} \cdot \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_G} v_{(ij)} + w_{ess} \cdot E^{arm} \quad (3.2)$$

A função objetivo é composta por três parcelas. A primeira parcela se constitui do somatório do produto do estado $u_{(ij)}$ de cada gerador pelo custo associado ao consumo de combustível $C_{(ij)}^{pty}$. A segunda parcela representa o somatório dos comandos de partidas $v_{(ij)}$ dos geradores. A terceira parcela é representada por contribuição da capacidade de armazenamento E^{arm} . Os subíndices i e j representam os instantes da curva de demanda que a microrrede deve atender e a indicação do gerador, respectivamente.

Os fatores w_{pty} , w_{stu} e w_{ess} são escolhidos de maneira que as parcelas tenham contribuições equivalentes no valor do objetivo após a otimização. Como as parcelas associadas devem ser minimizadas, os fatores são considerados com sinal positivo na função objetivo.

Em relação ao custo, considerando o gerador j no intervalo i e seu consumo específico de combustível expresso por $sfoc_{(ij)}$, defini-se o custo de consumo de combustível associado representado por

$$C_{(ij)}^{pty} = sfoc(P_{(ij)}^{gen}) = \sum_{k=0}^{G_P} m_k \cdot [P_{(ij)}^{gen}]^k \quad (3.3)$$

Com a otimização, pode ser alcançada redução do tempo de operação global das fontes convencionais, menor consumo de combustível, redução do número de partidas e dimensionamento otimizado do armazenamento. A inclusão da capacidade do armazenamento evita processo de se elaborar formulação com outra função objetivo, situação apresentada em [BOVERI et al. \[1\]](#).

3.2.2 Restrições

Capacidade do armazenamento

A capacidade de armazenamento está relacionada com a disponibilidade de espaço a bordo dos navios. Como o projeto de embarcações, especialmente para os navios de combate, é definido para otimização de espaços e busca de menor deslocamento possível, espaços não ocupados são bem limitados. Portanto, a restrição da variável do problema E^{arm} definida para a capacidade do armazenamento

$$E_{min}^{arm} \leq E^{arm} \leq E_{max}^{arm} \quad (3.4)$$

é incluída na formulação, sendo E_{min}^{arm} e E_{max}^{arm} capacidades mínima e máxima admitidas no problema.

Estado de carga da bateria

Conforme modelo apresentado em BOVERI et al. [1], HOW et al. [49] proveniente do método *coulomb counting*, o estado de carga da bateria pode ser calculado, considerando tensão constante na saída do armazenamento, como

$$SoC_f = SoC_0 - \sum_{i=1}^{N_S} \frac{P_{(i)}^{arm} \cdot \eta \cdot h \cdot 100}{E^{arm}}, \quad (3.5)$$

sendo E^{arm} em Wh e $P_{(i)}^{arm}$ em W, h o período em horas correspondente ao intervalo i , SoC_0 o estado de carga inicial e SoC_f o estado de carga final.

No modelo derivado, o $SoC_{(i)}$ é o estado de carga anterior somado com o montante de energia em função da potência de armazenamento no intervalo i :

$$SoC_{(i)} = SoC_{(i-1)} - \frac{P_{(i)}^{arm} \cdot \eta \cdot h \cdot 100}{E^{arm}}. \quad (3.6)$$

Essa equação deverá ser prevista no algoritmo para determinar as transições de estados de carga entre os intervalos. Além disso, como a capacidade do armazenamento é variável de otimização, essa restrição possui caráter não linear.

Em relação à faixa aceitável de operação do armazenamento, considerando-se o estado de carga, define-se que seus valores limites deverão ser incluídos na otimização na forma de

$$SoC^{min} \leq SoC_{(i)} \leq SoC^{max}, \quad (3.7)$$

já que nessa faixa de operação, a tensão do armazenamento possui variação linear e para não haver degradação prematura dos elementos de bateria por operação com estados de carga em nível baixo.

Por outro lado, de forma a alcançar aproveitamento completo da energia do armazenamento, o estado de carga apresentado no fim do ciclo de demanda deve ser o mesmo considerado no início, sendo, então, incluída a restrição

$$SoC_f = SoC_0 \quad (3.8)$$

na formulação do problema.

Estado e comandos de partida e de parada dos geradores

Os geradores deverão possuir característica de operação semelhante à ilustrada pela Tabela 3.1, onde as linhas são definidas para cada intervalo i , os valores de u são 1, para $P^{gen} > 0$, e 0, para $P^{gen} = 0$, os comandos de partida v e de parada w iguais a 1, para seu acionamento, e 0, para ausência de comandos de partida e de parada. As variáveis de estado e de comando dos geradores são binárias.

Tabela 3.1: ilustração de correspondência entre valores de potências, de estados e de comandos de partida e de parada dos geradores.

i	$P_{(i1)}^{gen}$	$u_{(i1)}$	$v_{(i1)}$	$w_{(i1)}$	$P_{(i2)}^{gen}$	$u_{(i2)}$	$v_{(i2)}$	$w_{(i2)}$	$P_{(i3)}^{gen}$	$u_{(i3)}$	$v_{(i3)}$	$w_{(i3)}$
1	157	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	168	1	0	0	0	0	0	0	150	1	1	0
3	0	0	0	1	145	1	1	0	150	1	0	0
4	0	0	0	0	143	1	0	0	145	1	0	0
5	177	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
6	180	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A Tabela 3.1 mostra que a mudança de estado u possui efeito nos comandos v e w . Na mudança de estado, as variáveis de comando tem seu valor alterado conforme a Equação 3.9 que mostra a relação entre estado e comandos, considerando a relação sequencial entre as variáveis u , v e w . Cada gerador diesel deverá atender essa relação para todos os intervalos i .

$$u_{(i-1,j)} - u_{(ij)} = w_{(ij)} - v_{(ij)} \quad (3.9)$$

Restrição de demanda

Considerando o balanço de potência na microrrede, as potências de todas as fontes de energia, dos geradores $P_{(ij)}^{gen}$ e do armazenamento $P_{(i)}^{arm}$, deverão atender à demanda $P_{(i)}^{dem}$ a cada intervalo, conforme

$$\sum_{j=1}^{N_G} P_{(ij)}^{gen} \cdot u_{(ij)} + P_{(i)}^{arm} = P_{(i)}^{dem}. \quad (3.10)$$

A restrição de demanda descrita em (3.10), soma das fontes de energia igual à carga, é considerada como a soma da potência do armazenamento mais a soma dos

produtos de potência e dos estados de cada gerador igual à demanda de potência. Essa restrição tem a função de estabelecer balanço de potências e possibilitar correspondência entre os estados dos geradores e suas potências, de maneira que geradores em operação resultam em estado 1 e geradores com potência nula resultam em estado zero.

Número mínimo e máximo de geradores em operação

Considerando, a quantidade de geradores em operação, sugere-se, dependendo do propósito da embarcação, que haja pelo menos uma fonte de geração convencional em operação, principalmente, se não houver previsão de aplicação de conversor formador de rede. Em termos de modelo, a restrição é escrita como

$$\sum_{j=1}^{N_G} u_{(ij)} \geq N_G^{min} = 1, \quad (3.11)$$

sendo N_G^{min} o número mínimo de geradores em operação.

Por outro lado, admitindo-se condição operacional com redundância da planta de geração com um gerador em regime *stand-by*, então, o número máximo de geradores em operação simultânea deve ser

$$\sum_{j=1}^{N_G} u_{(ij)} \leq N_G^{max} = N_G - 1, \quad (3.12)$$

sendo N_G o número de geradores da microrrede e N_G^{max} o número máximo de geradores em operação simultânea.

Restrição de potência das fontes geradoras

No caso dos geradores, como fonte que não admite potência inversa, o valor mínimo é zero e o valor máximo é a potência nominal, conforme descrito em (3.13), e para o caso do armazenamento, como há previsão de carregamento, a potência mínima deverá ser especificada conforme o ciclo de carga mais favorável, conforme descrito em (3.14).

$$P_{min}^{gen} \leq P_{(ij)}^{gen} \leq P_{max}^{gen} \quad (3.13)$$

No caso de geradores diesel com capacidade de geração diferentes, devem ser incluídas as restrições separadas por unidades geradoras, com valores mínimos e máximos conforme cada gerador.

Deve-se, ainda, considerar limitação de potência proveniente do sistema de armazenamento. Os valores máximos são correspondentes ao valor especificado conforme espaço disponível para instalação a bordo e atendimento de demanda de potên-

cia, e os valores mínimos são definidos conforme o perfil de operação esperado dos equipamentos.

De acordo com pesquisa em manuais técnicos de fabricantes, as baterias podem descarregar ou carregar a taxa de até 3 vezes a capacidade nominal. Os limites considerados são da forma

$$-2E^{arm}/h \leq P_{(i)}^{arm} \leq 2E^{arm}/h. \quad (3.14)$$

3.3 Método de resolução

O método de resolução segue o modelo apresentado na Figura 3.3. A natureza não linear do problema procede das restrições de demanda, do modelo de estado de carga do armazenamento e da função custo por consumo de combustível, devido inclusão do produto de duas variáveis de otimização, quociente do capacidade do armazenamento e função polinomial correspondente ao consumo específico de combustível, respectivamente.

Considera-se, na formulação, utilização de curva de demanda de potência hipotética, mas com base na capacidade de geração de energia de dois geradores, a qual possui 288 amostras. Considera-se, ainda, que o problema possui 14 variáveis, 9 binárias, estados e comandos dos geradores, 4 variáveis de potência, armazenamento e geradores, e 1 variável de estado de carga, para cada amostra de demanda. Portanto, são 4.033 variáveis, incluindo-se a capacidade do armazenamento, contínuas e inteiras, das quais 2.592 correspondem aos estados e comandos de partida e de parada dos geradores.

Como a formulação possui restrição e parcela da função de objetivo com natureza não linear, o problema se enquadra como um problema de programação não linear inteira mista.

A formulação do gerenciamento virtual é incluída no ambiente de modelagem *Python Optimization Modeling Objects*, Pyomo, para montagem da função objetivo e restrições, com utilização do software MindtPy combinado com os *solvers Interior Points Optimizer*, IPOPT, para resolução da parcela não linear, e *Coin-OR Branch and Cut*, CBC, para resolução da parcelas de variáveis inteiras.

O Pyomo é um pacote de software de código aberto que permite definição e solução de problemas de otimização usando a linguagem de *script* Python, inclui classes para definir conjuntos esparsos, parâmetros e variáveis, que podem ser usados para formular expressões algébricas que definem objetivos e restrições. Além disso, pode ser usado para representar modelos lineares, inteiros mistos, não lineares e não lineares inteiros mistos para problemas do mundo real de grande escala que envolvem

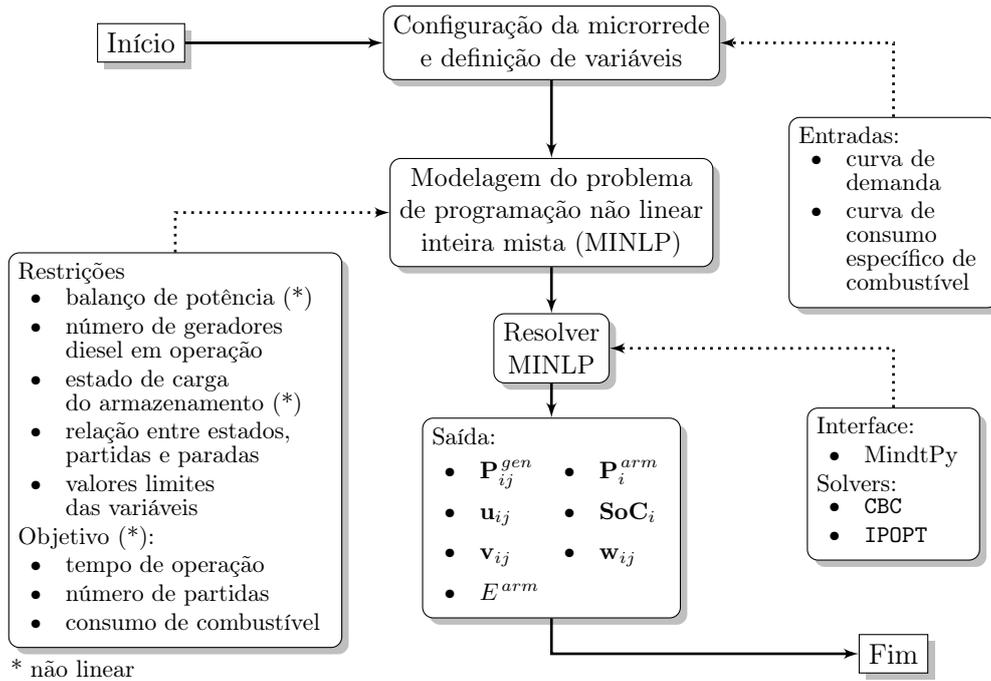


Figura 3.3: diagrama de resolução do problema do gerenciamento virtual com dimensionamento do armazenamento (adaptado de KHAN [4]).

milhares de restrições e variáveis. Os modelos Pyomo podem ser analisados por vários *solvers* de otimização, incluindo GLPK, CBC, CPLEX, GUROBI e IPOPT WAN et al. [50]. De modo simplificado, se trata de ambiente de modelagem de problemas de otimização, usado em combinação com *softwares* que possuem interfaces com *solvers* diversos para resolução de problemas de programação linear e não linear.

Por outro lado, a interface *Mixed-Integer Nonlinear Decomposition Toolbox in Pyomo* (MindtPy) possui meios para que os usuários resolvam problemas MINLP usando algoritmos de decomposição. Esses algoritmos de decomposição geralmente dependem de solução de problemas MILP e problemas de programação não linear (NLP) BERNAL e PENG [51].

Os seguintes algoritmos estão atualmente disponíveis no MindtPy: *Outer Approximation* (OA), *Branch-and-Bound* baseado em LP/NLP (LP/NLP BB), *Extended Cutting Plane* (ECP), *Global Outer-Approximation* (GOA), *Regularized Outer-Approximation* (ROA) e *Feasibility Pump* (FP).

Na aplicação do algoritmo OA, de maneira simplificada, considera-se um vetor exequível de variáveis inteiras e resolve-se o NLP na região dos valores inteiros escolhidos. Após, é resolvido o MILP com função objetivo e restrições linearizadas no ponto da solução NLP. A solução deste MILP é usada como novo ponto a ser considerado para formar mais um NLP para resolução. Esses passos são repetidos até que haja convergência.

Conforme DURAN e GROSSMANN [40], o objetivo da aproximação é conceder

representação poliedral de espaço exequível de modo que essa representação resulte em linearidade para as variáveis contínuas e permita abordar o problema MINLP como um MILP.

Em relação à resolução do problema para obtenção das variáveis inteiras, RUSTEM *et al.* [52] afirma que o objetivo e as restrições são linearizados na solução ótima destes problemas de programação não linear (NLP) e as linearizações são adicionadas a todos os nós não resolvidos da árvore de enumeração. Além disso, planos de corte de Gomory, que são válidos em toda a árvore, são gerados em nós selecionados. Esses cortes ajudam o algoritmo a localizar soluções inteiras rapidamente e, conseqüentemente, melhoram a aproximação linear do objetivo e das restrições nos nós não resolvidos da árvore. Resultados numéricos mostram que a adição de cortes de Gomory pode reduzir o número de nós na árvore de enumeração.

O *Interior Points Optimizer*, IPOPT, é um pacote de software de código aberto para otimização não linear em grande escala. O IPOPT implementa um método de filtro de busca linear de ponto interior. Esta abordagem torna o IPOPT particularmente adequado para problemas grandes com milhões de variáveis e restrições, assumindo que a matriz jacobiana da função de restrição é esparsa, mas também problemas pequenos e densos podem ser resolvidos eficientemente WAN *et al.* [50].

O IPOPT aplica um método de barreira logarítmica às restrições de desigualdade no problema de programação não linear (NLP), resolve um conjunto de problemas de otimização com restrições de igualdade para uma sequência monótona decrescente do parâmetro de barreira e converge rapidamente para a solução do NLP original. Esta sequência de problemas é resolvida com um método de Newton aplicado às condições KKT. O algoritmo do IPOPT possui excelentes propriedades de convergência e apresenta um desempenho superior, especialmente em problemas de otimização dinâmica de grande porte BIEGLER e ZAVALA [53].

Problemas de otimização podem ser fornecidos ao IPOPT, com uso de algumas linguagens para modelagem, como AMPL, GAMS ou Pyomo, que permitem especificar a formulação do problema matemático em um formato de texto facilmente legível, ou escrevendo código de programação (C++, C, Fortran 77, Matlab) que calcula as funções do problema e suas derivadas WAN *et al.* [50].

A resposta da otimização consiste das matrizes de potências \mathbf{P}_{ij}^{gen} , de estados \mathbf{u}_{ij} , dos comandos de partida \mathbf{v}_{ij} e dos comandos de parada \mathbf{w}_{ij} dos geradores e dos vetores de potência \mathbf{P}_i^{arm} e de estado de carga \mathbf{SoC}_i do armazenamento, além da capacidade do armazenamento.

3.4 Execução do gerenciamento

3.4.1 Dados de inicialização

A curva de demanda de potência do navio considerada no problema é apresentada na Figura 3.4.

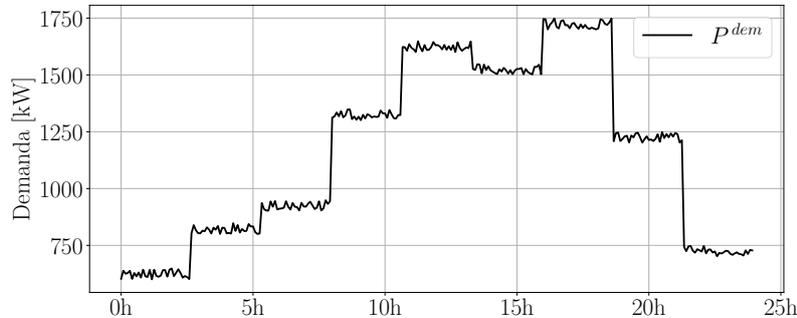


Figura 3.4: curva de demanda de potência do navio considerada na otimização.

No problema, são definidas algumas restrições as quais são elaboradas conforme considerações mostradas na Tabela 3.2. A microrrede é composta por três geradores, com operação de pelo menos 1 gerador e, no máximo, 2 geradores. A potência máxima dos geradores é definida como a nominal, 1MW.

Em relação à potência do armazenamento, está limitada ao dobro da capacidade do armazenamento, tanto para carga como para descarga.

Já a capacidade de armazenamento está limitada por valor mínimo de 100 kWh para se obter vantagem de redução de parâmetros da microrrede e valor máximo de 900kWh correspondente ao espaço de máximo que poderia ser destinado a bordo para o referido sistema. Esses limites são escolhidos para obtenção de valores de potência do armazenamento comparáveis com as potências dos geradores, já que a capacidade do armazenamento delimita sua potência, conforme incluído em (3.14).

Quanto ao estado de carga, define-se operação na faixa de 20% a 85%, faixa que corresponde à condição linear na relação entre parâmetros do armazenamento.

São considerados 288 valores de demanda, conjunto que corresponde à 24h, em intervalos de 5 minutos.

Quanto aos valores dos fatores de ponderação, w_{pty} , w_{stu} e w_{ess} , são escolhidos para que os valores das parcelas totais contribuam igualmente com o valor da função objetivo.

3.4.2 Resultado da otimização

A Figura 3.5 apresenta curvas de potências dos geradores, em operação, com valores próximos do nível de carregamento otimizado. Em geral, em condição de demanda de potência superior à capacidade de 1 gerador, o armazenamento responde

Tabela 3.2: considerações do gerenciamento virtual.

Parâmetro	Valor
Número de geradores da microrrede, N_G	3
Número máximo de geradores em operação, N_G^{max}	2
Número mínimo de geradores em operação, N_G^{min}	1
Potência máxima de operação do geradores, P_{max}^{gen}	1 MW
Potência máxima do armazenamento, P_{max}^{arm}	$2E^{arm}/h$
Potência mínima do armazenamento, P_{min}^{arm}	$-2E^{arm}/h$
Capacidade do armazenamento máxima, E_{max}^{arm}	900 kWh
Capacidade do armazenamento mínima, E_{min}^{arm}	100 kWh
Estado de carga mínimo, SoC_{min}	20%
Estado de carga máximo, SoC_{max}	85%
Número de valores de demanda, N_S	288
Intervalo, h	1/12 h
Grau do polinômio sfoc, G_P	9
Fatores de ponderação, w_{stu} , w_{pty} e w_{ess}	10^6 , 1 e 0,05

pela demanda excedente e quando a demanda é inferior à capacidade de 1 gerador, o armazenamento é carregado para permitir operação do gerador em condição de operação otimizada. A capacidade do armazenamento obtida que resultam nos perfis de potência é $E_{opt}^{arm} = 426,47$ kWh.

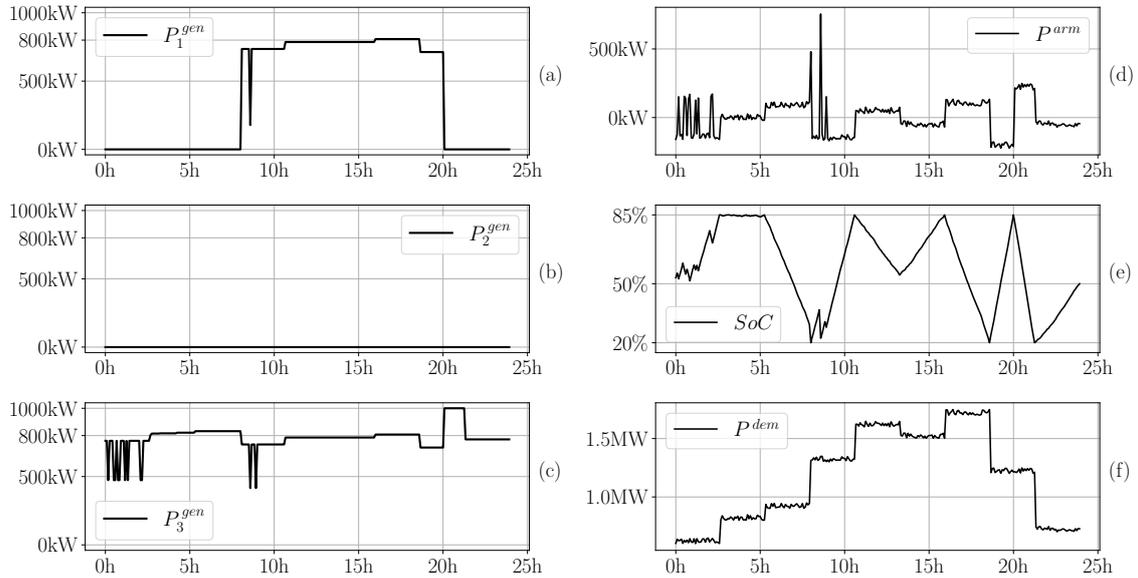


Figura 3.5: (a), (b), (c) potências dos geradores 1, 2 e 3, respectivamente, (d) potência do armazenamento, (e) estado de carga do armazenamento e (f) curva de demanda da microrrede.

O ponto de destaque entre os perfis de potência estado de carga é que nos períodos em que há contribuição do armazenamento para microrrede ou carga do armazenamento, os geradores operam com nível de carregamento próximo ao menor valor de consumo específico de combustível. Deve-se destacar, também, o tempo de operação reduzido dos geradores diesel, visto que o armazenamento contribui para evitar a

entrada do segundo gerador em operação.

Quanto aos estados e comandos de partida, a Figura 3.6 mostra os estados de operação dos geradores em condição compatível com as curvas de potência dos geradores, demonstra que os comandos de partida acompanham a formulação elaborada na medida que ocorrem em número reduzido e em correspondência com as potências do geradores.

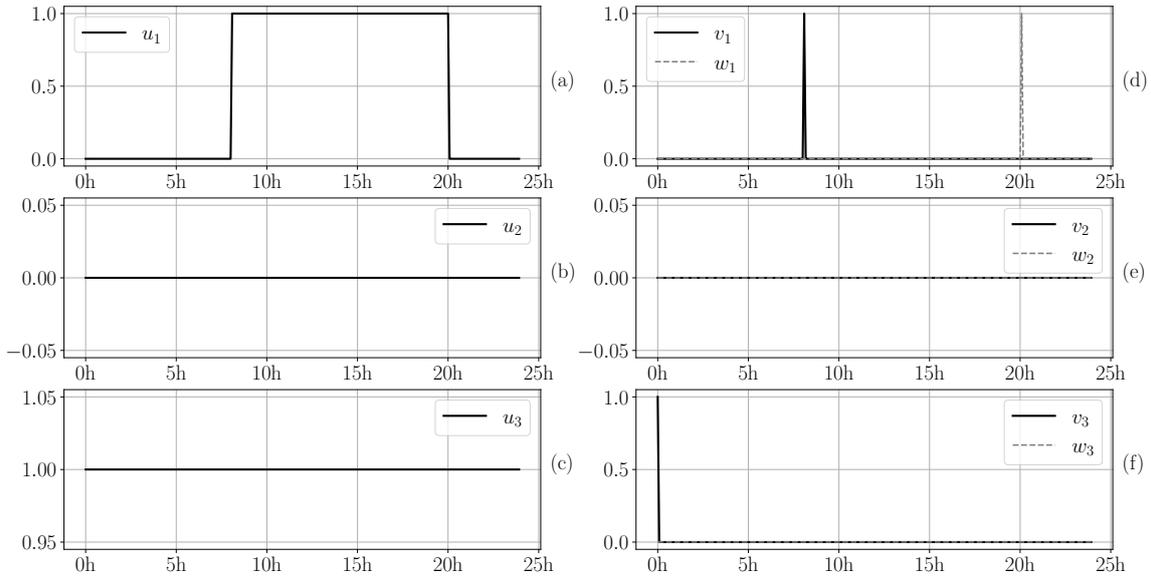


Figura 3.6: (a), (b) e (c) estados do geradores 1, 2 e 3, respectivamente, e (d), (e) e (f) comandos de partida e de parada dos geradores 1, 2 e 3, respectivamente.

Com os fatores de emissão indicados na Tabela 2.1, são calculadas as emissões dos motores considerando-se o gerenciamento virtual obtido por meio da minimização da função custo de gerenciamento de potência sujeita às restrições apresentadas. A emissões são apresentadas na Tabela 3.3 em conjunto com a capacidade de armazenamento, o tempo de operação, número de partidas, número de paradas e consumo de combustível obtidos.

3.5 Conclusões parciais

A formulação do problema do gerenciamento virtual demonstra ser compatível com um problema de programação não linear inteira mista na medida que o resultado da otimização apresenta valores coerentes com os dados de inicialização e com as restrições.

A resolução do problema de MINLP apresenta potências dos geradores e armazenamento, estados e comandos de partida e parada dos geradores, curva do estado de carga do armazenamento e, a mais destacada variável buscada, a capacidade do

Tabela 3.3: resumo dos resultados da otimização.

Resultados ⁽ⁱ⁾	Microrrede convencional ⁽ⁱⁱ⁾	Microrrede com armazenamento ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Capacidade do armazenamento otimizado, E_{opt}^{arm}	–	426,27 kWh
Tempo de operação	48 h	36,0 h (-25,0%)
Número de partidas dos geradores	2	2
Número de paradas dos geradores	0	1
Potência mínima do armazenamento	–	-222,74 kW
Potência máxima do armazenamento	–	754,54 kW
Consumo diesel	6904,25 kg	6493,04 kg ^(iv)
Dióxido de carbono CO ₂	21,5 ton	20,22 ton ^(iv)
Óxidos de nitrogênio NO _x	524,03 kg	492,82 kg ^(iv)
Óxidos de enxofre SO _x	350,94 kg	330,04 kg ^(iv)
Particulados PM	100,04 kg	94,08 kg ^(iv)
Monóxido de carbono CO	19,87 kg	18,70 kg ^(iv)

⁽ⁱ⁾ operação de 24h

⁽ⁱⁱ⁾ considerando-se operação de dois geradores diesel

⁽ⁱⁱⁱ⁾ operação dos geradores diesel em conjunto com o armazenamento de 426,47 kWh

^(iv) redução de 5,96 %

armazenamento. Apresenta ainda, redução significativa em consumo de combustível e redução do tempo de operação das fontes convencionais.

Considerando-se o objetivo de redução do consumo de combustível, que alcança o valor de cerca de 5%, e redução do tempo de operação em cerca de 23%, a otimização atinge seu propósito.

Apesar da resolução do problema apresentado, este capítulo sintetiza projeção ou provável conjunto otimizado de perfis de potências ao longo de período de um dia de operação, ou seja, considerando todos os valores de demanda de potência, combinados em um problema de otimização, para obtenção de balanço energético favorável. Para gerenciamento de potências em operação, é necessário reformulação do problema quando da aplicação real de gerenciamento da microrrede, como apresentado no próximo capítulo.

Capítulo 4

Gerenciamento de operação da microrrede

No capítulo anterior, é abordada formulação para otimização de forma a obter diminuição de tempo de operação dos geradores, redução da quantidade de comandos de partida dos geradores, aumento do rendimento dos motores diesel e dimensionamento do armazenamento de um navio com otimização não linear combinada com gerenciamento virtual por meio de resolução de problema de programação linear inteira mista para obtenção de variáveis de potência de geradores e potência de armazenamento de uma microrrede sujeita ao perfil de carga de um navio durante um ciclo operativo característico do navio de vinte e quatro horas.

Neste capítulo, o foco está no nível de carregamento dos geradores, na potência entregue pelo armazenamento a cada instante de aquisição de dados e no estado de carga do armazenamento. Nesse caso, a otimização do problema é abordada para cada instante de operação da microrrede. Portanto, tempo de operação dos geradores não seria, em tese, variável de otimização na formulação, embora esteja contida de maneira indireta no custo por consumo de combustível.

Por outro lado, o conjunto das otimizações sucessivas considerando todos os valores da curva de demanda, usada no capítulo anterior, representa o gerenciamento da operação, que resulta nos perfis de potência dos geradores e do armazenamento, na curva do estado de carga da bateria e no mapa dos estados e dos comandos dos geradores.

É proposto gerenciamento por meio de otimização de problema de programação linear inteira mista, que consiste em formulação aplicada, semelhante à formulação do capítulo anterior, mas de caráter linear, que leva à formulação simplificada, porém robusta, e, conseqüentemente, a considerar linearizações de modelos e de expressões não lineares.

4.1 Consumo específico de combustível linearizado

O modelo de custo adotado é elaborado com uso da curva de consumo específico de combustível mostrada em BOVERI *et al.* [1], assim como no capítulo anterior. Como a curva, Figura 3.2, possui característica não linear, ela é dividida em partes menores associadas a faixas de potências, de modo que a relação entre essas faixas e o consumo específico de combustível seja linear.

A escolha por esse modelo está relacionada com as restrições para resolver problemas de programação linear por meio do algoritmo *simplex* juntamente com o *branch and bound*, cujos processos não admitem formulações não lineares, quer seja da função objetivo, quer seja das restrições do problema.

Como uma das premissas do gerenciamento é redução de consumo de combustível dos geradores, é feita proposição de variável auxiliar que representa o consumo de combustível na operação dos geradores. Nesse contexto, para adaptar a característica não linear da curva de consumo de específico, utiliza-se linearização por partes de modo a incluir o consumo na formulação do problema, como ilustrado na Figura 4.1.

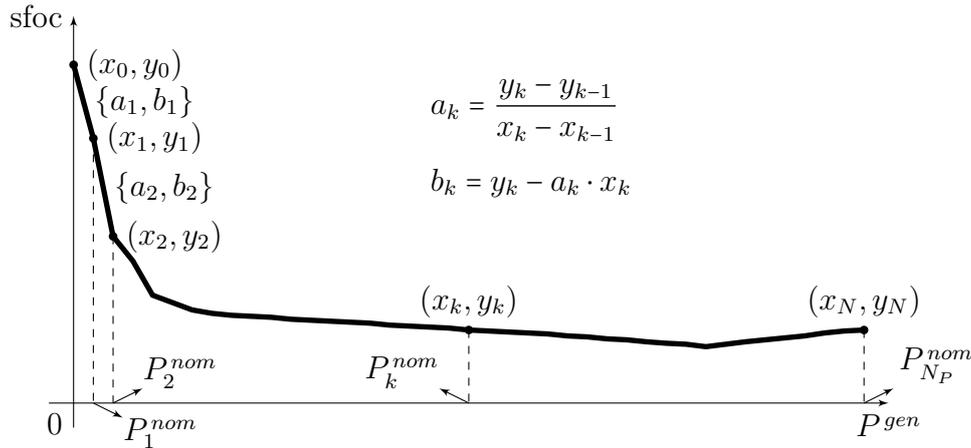


Figura 4.1: linearização da curva de consumo específico de combustível dos geradores.

Cada ponto (x_k, y_k) é composto por potências e seus valores de consumo específico de combustível associados. Após obtenção dos valores de a_k e de b_k , coeficientes angular e linear correspondentes aos trechos da curva, pode-se então estabelecer modelo do consumo específico de combustível $\text{sfoc}_{(j)k}$, variável auxiliar, para cada parcela k de potência, para cada gerador j , como sendo

$$\text{sfoc}_{(j)k} = a_k \cdot P_{(j)k}^{\text{gen}} + b_k \cdot u_{(j)k}, \quad (4.1)$$

com $u_{(j)k}$, variável de otimização auxiliar, binária, acoplada a cada intervalo de potência $P_{(j)k}^{\text{nom}}$ conforme

$$P_{k-1}^{nom} \cdot u_{(j)k} \leq P_{(j)k}^{gen} \leq P_k^{nom} \cdot u_{(j)k}. \quad (4.2)$$

A inclusão da variável binária $u_{(j)k}$ possui objetivo de concentrar a potência de cada gerador em um único intervalo e não considerar os valores de b_k para os quais os valores de $P_{(j)k}^{gen}$ são nulos, visto que

$$\sum_{k=1}^{N_P} P_{(j)k}^{gen} = P_{(j)}^{gen}, \quad (4.3)$$

$$\sum_{k=1}^{N_P} u_{(j)k} = u_{(j)} \quad (4.4)$$

e

$$P_k^{nom} = k \frac{P^{nom}}{N_P}, \quad (4.5)$$

ou seja, como $u_{(j)}$, estado do gerador j , é binário, apenas uma entre as N_P variáveis $u_{(j)k}$, para cada gerador j , deverá ser 1.

Com isso, se define o custo de consumo de combustível, correspondente à parcela de potência k , C_k^{pty} , como o somatório dos sfoc_k dos geradores

$$C_k^{pty} = \sum_{j=1}^{N_G} \text{sfoc}_{(j)k}. \quad (4.6)$$

A formulação adotada tem o objetivo de separar os valores de potência possíveis em porções percentuais em função do consumo específico de combustível dos geradores diesel, por meio do uso dos valores apresentados nas curvas de desempenho desses geradores.

4.2 Gerenciamento da operação da microrrede

No capítulo anterior, são consideradas função e restrições lineares e não lineares para a formulação, mostrando a ligação entre variáveis contínuas e variáveis inteiras, potências, estado, comando de partida e comando de parada dos geradores, com inclusão de uma restrição não linear em complemento à restrição linear de demanda da microrrede.

Nesta seção, a formulação é elaborada como um problema de programação linear inteira mista, com função objetivo composta por custo de operação dos geradores, e por comandos de partida e de parada, com aplicação de restrições lineares. Na prática, a formulação é elaborada para cada valor de demanda, ou seja, para gerenciamento da operação são executadas otimizações sucessivas, uma para cada valor de demanda.

A restrição de demanda é reformulada de modo a não mais considerar a variável binária que acompanha a potência de cada gerador, e a capacidade do armazenamento não é mais variável de otimização mas um valor constante, E_{opt}^{arm} , obtido pelo método de gerenciamento apresentado no capítulo anterior.

Para definição do modelo do problema de otimização, são usadas 294 variáveis de otimização, sendo 280 variáveis auxiliares definidas com objetivo de linearização da função de consumo específico de combustível.

Consideram-se dois desafios de destaque nesta seção os quais são estabelecer correspondência entre as variáveis de potência e de estado dos geradores que deverão estar coordenados de modo que na condição de potência nula, o estado do gerador é 0, e no caso de potência superior a zero, o estado do gerador é 1, e vice-versa, e promover o cálculo do custo de consumo específico por meio de linearização de uma função de consumo específico de combustível, sendo este representado por função não linear.

Para alcançar esse objetivo, é usado algoritmo para análise situacional da microrrede a cada instante, o qual estabelece algumas faixas condicionais relacionadas com o estado de carga do armazenamento, potências mínimas e máximas do conversor e potências mínimas e máximas dos geradores.

4.2.1 Função objetivo

Com o objetivo de minimizar o número de partidas, somatório de $v_{(j)}$, e o número de paradas, somatório de $w_{(j)}$, dos geradores diesel na operação da microrrede, além de favorecer operação dos geradores diesel em nível de carregamento com melhor rendimento, contribuição feita por meio de C_k^{pty} , esses parâmetros são incluídos na função objetivo do problema, expressa por

$$\min_{\mathbf{x}} F_{obj}^{opr} = w_{stu}^{opr} \cdot \sum_{j=1}^{N_G} v_{(j)} + w_{std}^{opr} \cdot \sum_{j=1}^{N_G} w_{(j)} + w_{pty}^{opr} \cdot \sum_{k=1}^{N_P} C_k^{pty}, \quad (4.7)$$

sendo o vetor de variáveis de otimização

$$\mathbf{x} = \left[u_{(j)k}, u_{(j)}, P_{(j)k}^{gen}, C_k^{pty}, P_{(j)}^{gen}, P^{arm}, SoC, v_{(j)}, w_{(j)} \right]. \quad (4.8)$$

Não se inclui parcela de potência dos geradores e seus estados de maneira direta visto que são considerados simultaneamente na parcela de custo.

4.2.2 Restrições

Restrições de demanda

Em análise semelhante ao que é feito na formulação do dimensionamento do armazenamento, a principal restrição de operação da microrrede está relacionada com balanço de potência, apresentada na Equação 4.9.

$$\sum_{j=1}^{N_G} P_{(j)}^{gen} + P^{arm} = P^{dem} \quad (4.9)$$

Para estabelecer os limites operacionais de potência, são usadas as expressões

$$0 \leq P_{(j)}^{gen} \leq P_{max}^{gen} \cdot u_{(j)} \quad (4.10)$$

e

$$-2E_{opt}^{arm}/h \leq P^{arm} \leq 2E_{opt}^{arm}/h. \quad (4.11)$$

Restrição de estado e de comandos

Assim como é considerado por meio do gerenciamento virtual da microrrede para dimensionamento do armazenamento a partir da curva de demanda de potência do navio, as variáveis binárias de estado, u , de comando de partida, v e de comando de parada dos geradores, w , a formulação entre essas variáveis será a mesma mas com a condição da otimização restrita a cada valor de demanda, conforme (4.12).

$$\bar{u}_{(j)} - u_{(j)} = w_{(j)} - v_{(j)} \quad (4.12)$$

Para execução correta da resolução do modelo em relação à restrição da Equação 4.12, deve-se utilizar variável de armazenamento temporário, “*buffer*”, ou aplicar um bloco “*delay*” ao sinal da variável u .

Estado de carga

Como apresentado no Capítulo 3, o estado de carga do armazenamento deve apresentar variação seguindo-se o seguinte modelo:

$$SoC = \overline{SoC} - \frac{P^{arm} \cdot \eta \cdot h \cdot 100}{E_{opt}^{arm}}. \quad (4.13)$$

A operação do sistema de armazenamento também é condicionada pela faixa de valores aceitáveis de operação

$$SoC^{min} \leq SoC \leq SoC^{max}. \quad (4.14)$$

Número mínimo e máximo de geradores em operação

Considerando-se o número mínimo de geradores em operação a fim de garantir alimentação das cargas na operação da microrrede, deve-se estabelecer quantitativo de geradores carregados em conjunto com o armazenamento para certificar-se que haja condição de operação segura da microrrede vislumbrando situação de não otimização. Portanto, deve-se incluir restrição de quantidade de geradores em operação, expressa por

$$N_G^{min} \leq \sum_{j=1}^{N_G} u_{(j)} \leq N_G^{max}. \quad (4.15)$$

Além das restrições mostradas, deverão ser consideradas as faixas de valores de estado de carga, potência dos geradores diesel e potência do armazenamento.

Considerando-se as parcelas de potência dos geradores, estado dos geradores, comando de partida, custo por rendimento, estado de carga do armazenamento e as restrições de operação, pode-se definir a formulação completa.

4.3 Método de resolução

O caso em estudo se assemelha ao formulado no capítulo anterior, porém, ocorre otimização a cada valor de demanda. Outro destaque é o número de variáveis que é reduzido em relação ao anterior, com 294 variáveis de otimização, sendo 280 variáveis auxiliares declaradas, devido à linearização da função de custo de combustível. A Figura 4.2 mostra o diagrama descritivo da otimização.

É utilizada a função `PULP_CBC_CMD` disponível no módulo PuLP, biblioteca Python para modelagem linear, para interface com o *solver* CBC (*Coin-or branch and cut*), executável incluído na referida biblioteca, destinado à resolução de problemas de programação linear, de programação inteira e programação linear inteira mista.

O PuLP executa o CBC como um processo externo via linha de comando e, em seguida, comunica-se com ele para enviar e receber informações sobre o problema de otimização e sua solução.

Alguns *solvers* externos são invocados desta forma, por serem programas independentes que podem ser executados a partir da linha de comando. Ao usar a interface de linha de comando, o PuLP pode interagir com diversos *solvers* sem necessidade de integração direta com suas API internas.

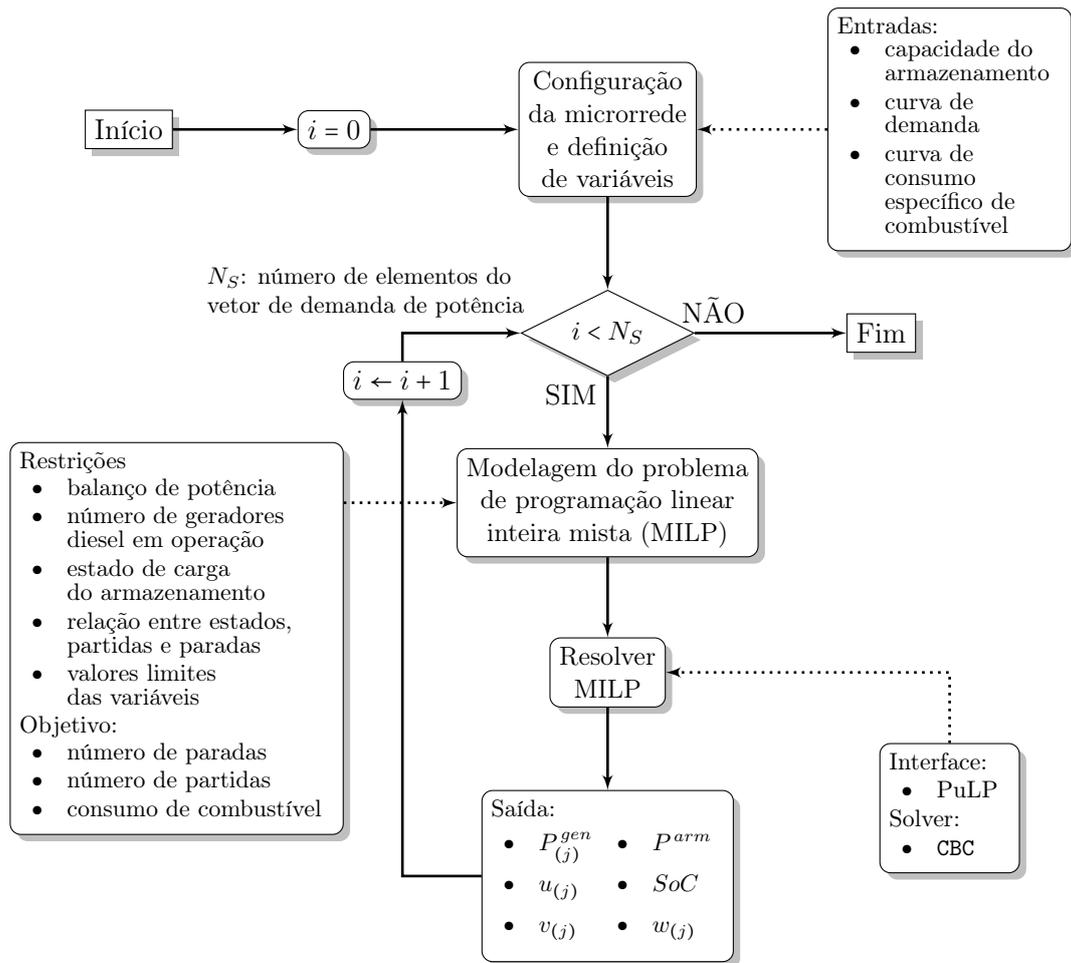


Figura 4.2: diagrama de resolução do problema de gerenciamento da microrrede na operação.

4.4 Execução da operação

4.4.1 Dados de inicialização

A resolução do problema de operação para obtenção das potências dos geradores diesel e do armazenamento é executada por meio de implementação de *script* Python com uso da biblioteca de modelagem de problema de programação linear inteira mista, PuLP, na qual é usado o *solver* CBC, o qual possui rotina de otimização baseada nos métodos *simplex* e *branch and cut*. A demanda de potência considerada na otimização é a mesma mostrada no capítulo anterior. Os dados de entrada considerados no problema são apresentados na Tabela 4.1.

Visto que a concepção é elaborada partindo-se da premissa de operação com conversor do armazenamento em modo seguidor de rede, a microrrede deverá operar com pelo menos um gerador conectado ao barramento.

Considerando-se os valores de demanda da instalação, não haveria necessidade de operação de três geradores simultaneamente, bastando-se dois dos geradores para alimentação da carga prevista.

Tabela 4.1: dados de entrada de operação.

Parâmetro	Valor
Número de geradores da microrrede, N_G	3
Número máximo de geradores em operação, N_G^{max}	2
Número mínimo de geradores em operação, N_G^{min}	1
Potência máxima de operação do geradores, P_{max}^{gen}	1 MW
Potência máxima do armazenamento, P_{max}^{arm}	852 kW
Potência mínima do armazenamento, P_{min}^{arm}	-852 kW
Capacidade do armazenamento, E_{Wh}^{arm}	426,47 kWh
Estado de carga mínimo, SoC_{min}	20%
Estado de carga máximo, SoC_{max}	85%
Número de intervalos, N_S	288
Intervalo, h	1/12 h
Fatores de ponderação, w_{pty}^{opr} , w_{stu}^{opr} e w_{std}^{opr}	1, 270 e 270

Quanto à demanda, a curva utilizada é a mesma indicada no capítulo anterior, a qual se constitui de vetor de 288 elementos com valores variados.

As potências máxima e mínima do armazenamento são definidas com base no valor absoluto máximo que é apresentado no dimensionamento do armazenamento. Quanto ao estado de carga, este deverá excursionar dentro da faixa de 20% a 85% de sua capacidade conforme recomendado pelos fabricantes.

4.4.2 Resultado da otimização

A Figura 4.3 mostra os perfis de potência e estados dos geradores diesel da microrrede. Os níveis de potência acompanham, em boa parte do período de simulação, o valor otimizado de potência de cerca de 80% do valor nominal, além de seguir as restrições de pelo menos 1 gerador em operação e de, no máximo, 2 geradores em operação simultânea.

Os comandos de partida e de parada dos geradores apresentados na Figura 4.4, mostram compatibilidade com os estados dos geradores tal como apresentado na formulação, mais especificamente na restrição de igualdade entre as variáveis de estado e de comandos.

Em relação ao sistema de armazenamento, cujas curvas de potência e de estado de carga estão apresentadas na Figura 4.5, o SoC se mantém na faixa estabelecida na restrição de 20% a 85%. Destaca-se, por contribuição do sistema de armazenamento, nos períodos de carga e de descarga, as potências dos geradores diesel, em geral, estão em níveis de rendimento otimizado de 80% de carregamento nominal.

Em relação aos valores de custo por consumo específico de combustível, a curva da Figura 4.6 mostra que os valores de C^{pty} se mantém próximos dos valores mínimos de 225 g/kWh, para 1 gerador em operação, e 450 g/kWh, para 2 geradores em

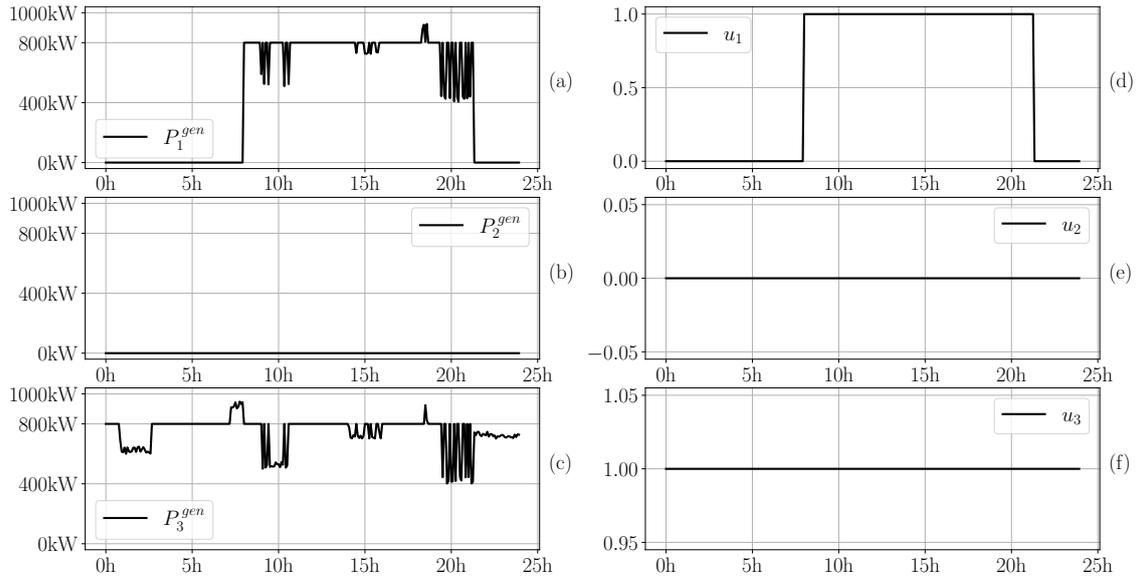


Figura 4.3: (a), (b) e (c) potências dos geradores e (d), (e) e (f) seus estados de operação.

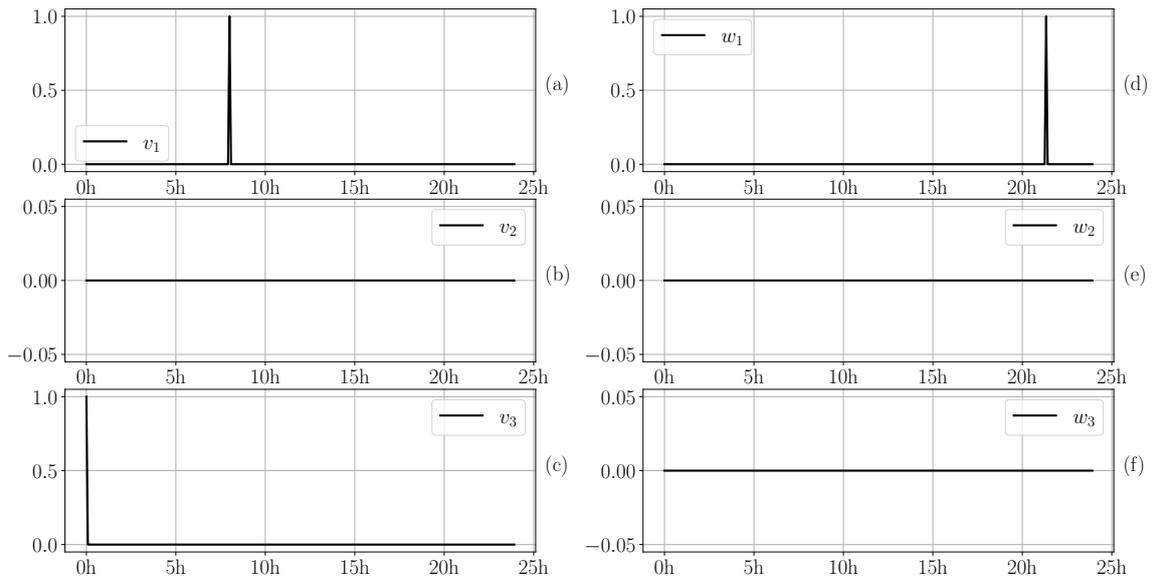


Figura 4.4: (a), (b) e (c) comandos de partida e (d), (e) e (f) comandos de parada dos geradores.

operação, condição que mostra que o gerenciamento definiu valores de potência que correspondem aos menores valores de consumo específico de combustível.

Quanto ao tempo de execução de cada passo do algoritmo, esse permaneceu, em boa parte da execução das otimizações, na ordem de 30ms. O tempo de aquisição de dados definido em aplicações em tempo real deve ser definido com base no máximo tempo de execução das otimizações. Como o tempo máximo registrado é 226 ms, o

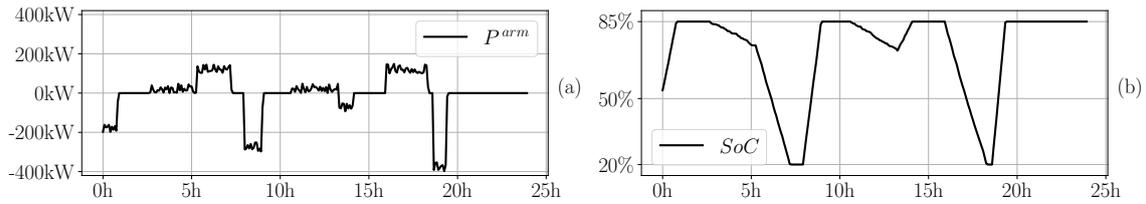


Figura 4.5: potência (a) e estado de carga (b) do armazenamento.

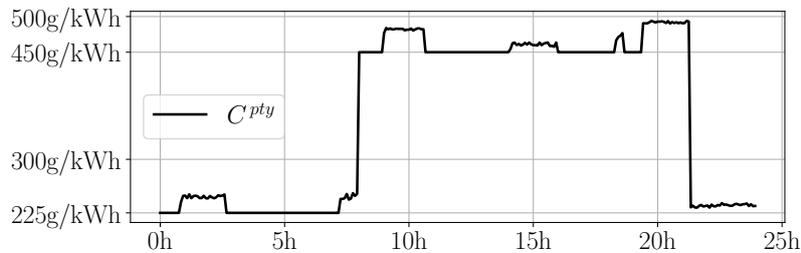


Figura 4.6: curva dos valores referentes à parcela consumo específico de combustível calculado para todos os geradores em operação.

passo de simulação na aplicação em tempo real deverá ser maior que o referido valor. A curva do tempo de execução dos passos do algoritmo é apresentada na Figura 4.7.

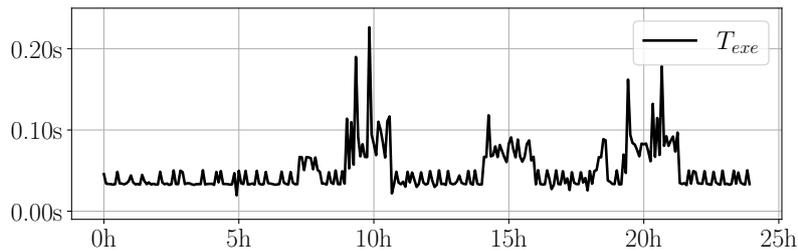


Figura 4.7: curva dos tempos de execução dos passos do algoritmo de otimização.

Considerando os fatores de emissão indicados na Tabela 2.1, são apresentados na Tabela 4.2 alguns parâmetros resultantes e valores de emissão de poluentes na operação.

4.5 Conclusões parciais

Em virtude do comportamento acentuado nas quedas e nas elevações do estado de carga do armazenamento, há dependência significativa de outras variáveis devido ao SoC do armazenamento.

No cálculo mais conservador, considerando-se a faixa de 20% a 85% de capacidade, há quedas e subidas nos instantes de maior impacto de demanda, sendo em redução ou em aumento, o que mostra a contribuição do armazenamento na microrrede nessas condições.

As curvas de potência dos geradores e a curva do estado de carga do sistema de

Tabela 4.2: comparativo entre operação convencional e otimizada.

Parâmetros ⁽ⁱ⁾	Microrrede convencional ⁽ⁱⁱ⁾	Microrrede com armazenamento ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Tempo de operação	48 h	37,33 h (-22,22%)
Número de partidas	2	2
Número de paradas	0	1
Potência mínima do armazenamento	–	-397,61 kW
Potência máxima do armazenamento	–	148,74 kW
Consumo diesel	6903,87 kg	6479,31 kg ^(iv)
Dióxido de carbono CO ₂	21,5 ton	20,18 ton ^(iv)
Óxidos de nitrogênio NO _x	524,00 kg	491,78 kg ^(iv)
Óxidos de enxofre SO _x	350,92 kg	329,34 kg ^(iv)
Particulados PM	100,04 kg	93,89 kg ^(iv)
Monóxido de carbono CO	19,88 kg	18,66 kg ^(iv)

⁽ⁱ⁾ 24h de operação

⁽ⁱⁱ⁾ operação de dois geradores diesel

⁽ⁱⁱⁱ⁾ operação dos geradores diesel em conjunto com o armazenamento de 426,47 kWh

^(iv) redução de 6,15 %

armazenamento mostram que a condição de melhor aproveitamento energético dos geradores ocorre nos instantes de carga e de descarga do armazenamento, ou seja, o sistema de armazenamento atua como reserva de energia para contribuir com *peak shaving* e também como carga para ajustar o carregamento dos geradores para o nível otimizado.

Quanto ao tempo de operação dos geradores, ao consumo de combustível e aos dados de emissão, os níveis obtidos no gerenciamento da operação são semelhantes aos apresentados no gerenciamento virtual.

Além disso, a faixa de potência do armazenamento obtida permitirá melhor escolha do conversor do armazenamento que deve ser usado na simulação em termos de capacidade, de dimensionamento do filtro RL e projeto de controle de potência do armazenamento.

Capítulo 5

Simulação da microrrede

Nos capítulos anteriores, são apresentadas medidas propostas pelo MEPC, órgão da ONU, para redução de emissões de gases de efeito estufa e valores de compromisso que deverão ser utilizados como referência para direcionar ações de redução, as topologias de microrredes aplicadas nos navios atualmente de forma a alcançar redução de emissão de gases por meio de otimização de gerenciamento de potências de motores diesel e dimensionamento de sistema de armazenamento em microrredes a bordo de navios.

Neste capítulo, é feita modelagem da microrrede em *simulink*, a qual é composta por três geradores de modelos simplificados, um *phased-locked loop*, para sincronização do conversor do armazenamento, inclusive para sistemas desequilibrados, um conversor de tensão e um armazenamento de energia. Os componentes são modelados no *simulink*.

Quanto ao controle secundário, ou seja, o que determina as referências de potências das fontes e frequência da microrrede, é usado bloco de *m-function* dentro do ambiente *simulink* para gerar os valores de referência de potência das fontes de energia usando-se função de otimização do *optimization toolbox* do Matlab para minimização de função custo de operação com restrições da microrrede conforme o modelo apresentado no capítulo anterior.

Em relação ao controle primário do conversor do armazenamento, a tensão do armazenamento é controlada por meio da otimização para controle de potência do armazenamento que determina a faixa de valores aceitáveis de estado de carga e o controle de corrente é executado por meio de modelagem *dq-frame*. Os geradores diesel são modelados por meio máquinas síncronas com controle de tensão realizado por meio de bloco pronto da biblioteca do *simulink*.

5.1 Sincronização do conversor do armazenamento

Vislumbrando-se necessidade de utilização de um sistema de sincronização em microrredes nas quais, na maioria das aplicações, as tensões são desequilibradas, utiliza-se na simulação a topologia *Double Second-Order Generalized Integrator Phased-Locked Loop* (DSOGI-PLL), Figura 5.1, a qual rastreia as componentes de sequência positiva e determina a frequência angular constante de sequência positiva do sistema. Entretanto, nessa simulação, não é considerada condição de desequilíbrio de tensão.

A aplicação do DSOGI-PLL é para verificação de operação e constatação da possibilidade de uso, visto que poderá haver desequilíbrio de tensão em virtude de desbalanço de carga no sistema elétrico do navio.

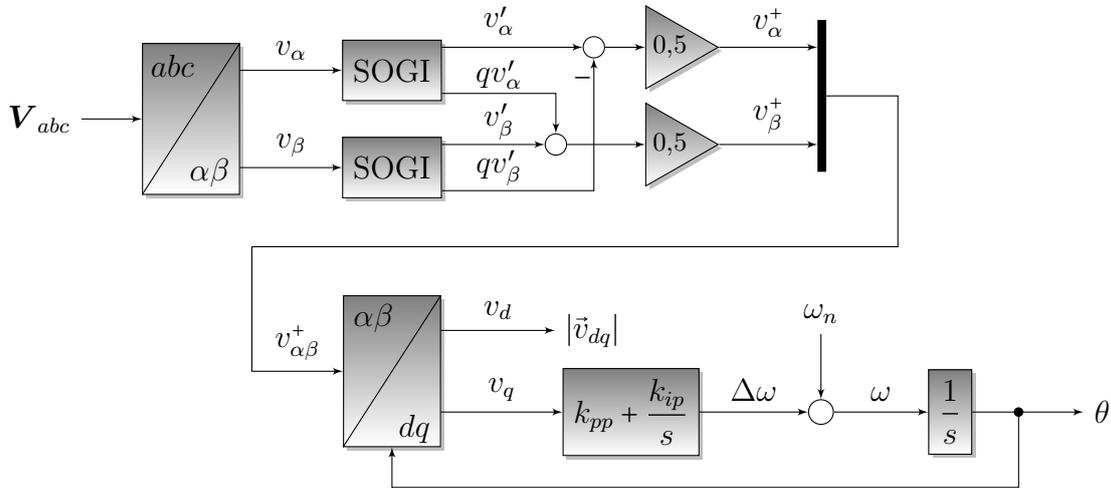


Figura 5.1: diagrama de controle do DSOGI-PLL WANG [5].

Para o projeto do controlador proporcional-integral do PLL, segue-se procedimento descrito em FRANKLIN et al. [54], considerando-se tempo de acomodação de 5 ms e sobressinal de 5%, o que corresponde à constante de amortecimento $\zeta = 0,69$. Essas considerações resultam em $k_{pp} = 4,899$ e $k_{ip} = 4,732 \cdot 10^3$.

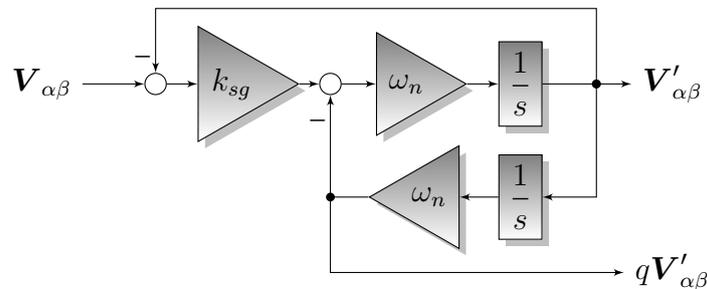


Figura 5.2: diagrama do SOGI WANG [5].

Em relação ao SOGI, apresentado na Figura 5.2, segundo WANG [5], para configuração otimizada, baseada nas curvas de ganho do SOGI, o valor de k_{sg} deve ser

$\sqrt{2}$, o qual é adotado na simulação.

5.2 Controle de operação da microrrede

Para o gerenciamento da microrrede, é usado o mesmo modelo de otimização descrito no capítulo 4 que mostra formulação de problema de programação linear inteira mista para minimização da função objetivo que possui parcelas de custo por consumo de combustível e comandos de partida e de parada. O código é incluído em uma *m-function*, Figura 5.3, cujas entradas são demanda de potência, estado de carga da bateria e estados anteriores dos geradores.

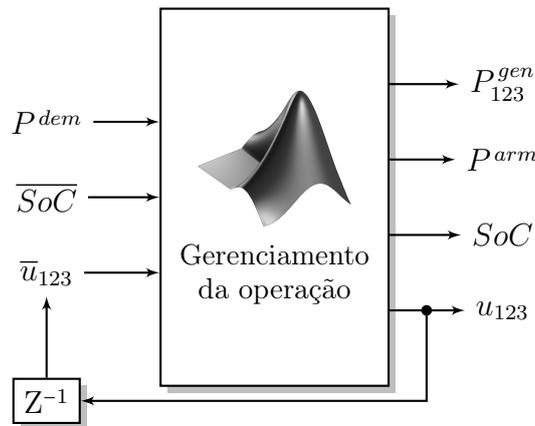


Figura 5.3: bloco de gerenciamento de potências, do estado de carga e indicação de estado dos geradores.

Nessa aplicação, é elaborado código para otimização de problema de programação linear inteira mista com o propósito de calcular os valores de referências de potências dos geradores, de potência do armazenamento, de estados e de comandos de partida e de parada dos geradores, bem como controle do estado de carga do armazenamento. É considerado intervalo de amostragem de 0,2s, o qual é superior ao tempo máximo de resolução do algoritmo de gerenciamento, apresentado na seção 5.5. Para aplicações em tempo real, o intervalo de amostragem deve ser definido de modo que não seja superior ao período de resolução do *solver* de otimização.

A resolução do problema de operação para obtenção das potências dos geradores diesel e do armazenamento é executada por meio de implementação de *script* Matlab. É usada a função `intlinprog`, *solver* equivalente ao `CBC`, que possui argumentos matriciais e vetoriais definidos conforme objetivo e restrições do problema de programação linear inteira mista, com a mesma formulação apresentada no capítulo anterior.

5.3 Controle de corrente e de potência do armazenamento

O controle de potência do conversor é implementado por meio da modelagem *dq-frame* de corrente apresentada em YAZDANI e IRAVANI [6]. Por outro lado, o controle de tensão do armazenamento é executado por meio do modelo do estado de carga do armazenamento, o qual é incluído no problema de otimização e assegura tensão do armazenamento em nível próximo ao nominal.

O valor de indutância máxima para que seja transmitida e recebida potência solicitada pelo armazenamento, conforme referência do gerenciamento, é

$$L_{max} = \frac{3(V_{rms})^2}{\omega P_{min}} = \frac{3(V_{rms})^2}{\omega P_{max}^{arm}}. \quad (5.1)$$

Por outro lado, a indutância utilizada na simulação, considerando variação de corrente, frequência de chaveamento e tensão da bateria, é calculada conforme apresentado em BERES et al. [55], e expressa por

$$L = \frac{V_{dc}}{8f_{ch}\Delta i_L} = \frac{V_{arm}}{8f_{ch}\Delta i_L}. \quad (5.2)$$

A partir dos dados obtidos pela função de controle de gerenciamento de potência, o valor de referência da malha de controle do conversor do armazenamento deverá ser P^{arm} . Na microrrede simulada, não é considerada potência reativa proveniente do armazenamento. Logo, deve-se considerar como nula na referência da malha de controle de corrente i_q . As potências de referência são incluídas na malha de controle conforme mostrado na Figura 5.4.

A frequência de chaveamento escolhida para operação do conversor do armazenamento é $f_{ch} = 5$ kHz. Conforme BARBI [56], deve-se estabelecer a frequência de cruzamento máxima da função de transferência de laço aberto correspondente a 1/4 da frequência de chaveamento.

Em relação ao filtro RL, considerando-se 400 kW de potência máxima do conversor e rendimento de 98%, a resistência do filtro assumiria valor máximo de 31 m Ω e indutância L_{max} obtida de 1,4 mH. Decidiu-se por $R = 5$ m Ω e $L = 1,245$ mH.

Os controladores de corrente $k_d(s)$ e $k_q(s)$ são do tipo proporcional-integral dimensionados considerando-se frequência de cruzamento da função de transferência de laço aberto em $\omega_c = 7.854$ rad/s, 1/4 da frequência de chaveamento, e potência ativa do conversor especificada em 400 kW, que é escolhido com base no máximo valor absoluto de potência obtida no capítulo anterior, o que resulta em $k_p = 9,778$ e $k_i = 40,055$.

A Figura 5.5 mostra as curvas de ganho e de fase das funções de transferência da planta, do controlador, da função de transferência laço aberto e da função de

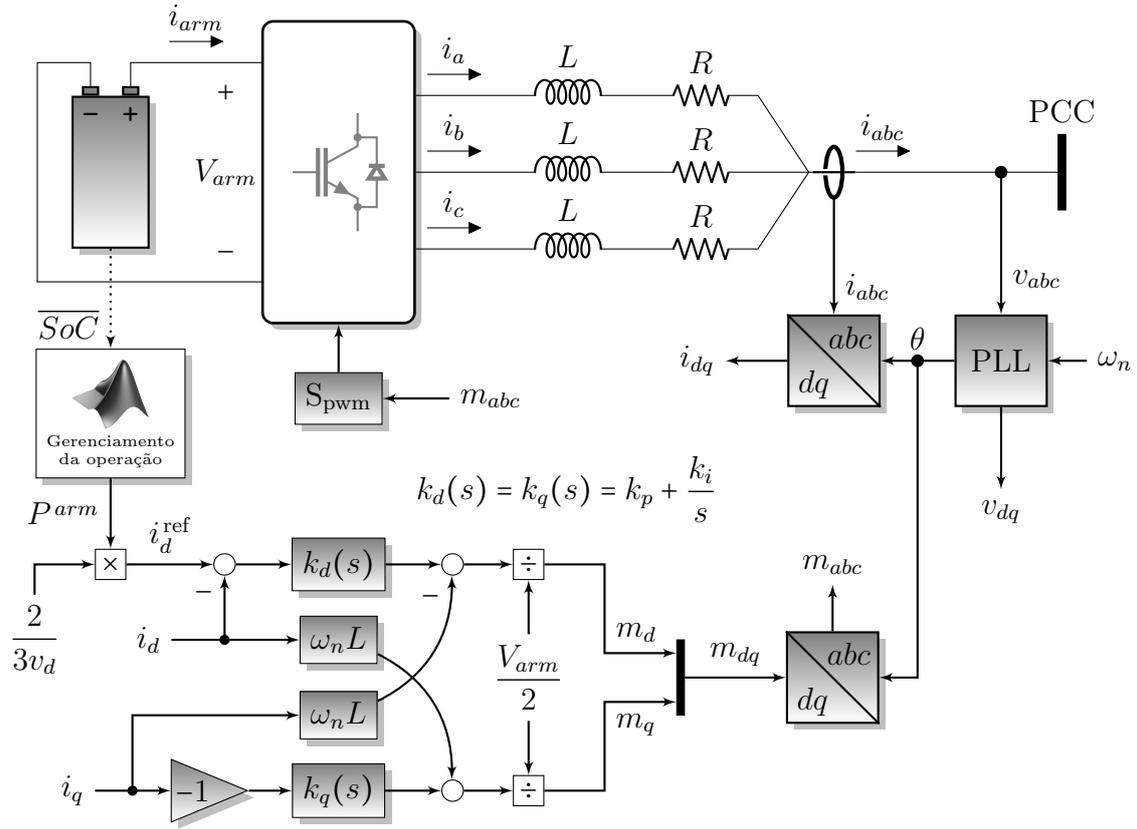


Figura 5.4: diagrama de controle de potência e de corrente dq -frame do conversor combinado com o controle do estado de carga do armazenamento por meio de otimização (adaptado de YAZDANI e IRAVANI [6]).

transferência de malha fechada. Além disso, a referida figura indica que o controlador aumenta a velocidade das malhas de corrente em cerca de uma década, visto que a frequência de cruzamento da função de transferência da planta é cerca de 800 rad/s.

5.4 Configuração dos geradores

Para simulação da microrrede, são usadas máquinas síncronas com potência nominal de 1 MW, 460 V, 60 Hz, com parâmetros de entrada em pu, cujo controle de tensão é feito por meio de bloco configurado do *simulink*, com tensão de referência de 1 pu. Já para frequência, são utilizados os sinais de potência do gerenciamento para obtenção das frequências por meio de reta de inclinação de potência/frequência expressa por

$$\omega_{(j)}^{\text{pu}} = \omega_n^{\text{pu}} - k_\omega \left(u_{(j)} \cdot \frac{\sum_j P_{(j)}^{\text{gen}}}{\sum_j u_{(j)}} - P^{\text{nom}} \right) / P^{\text{nom}}, \quad (5.3)$$

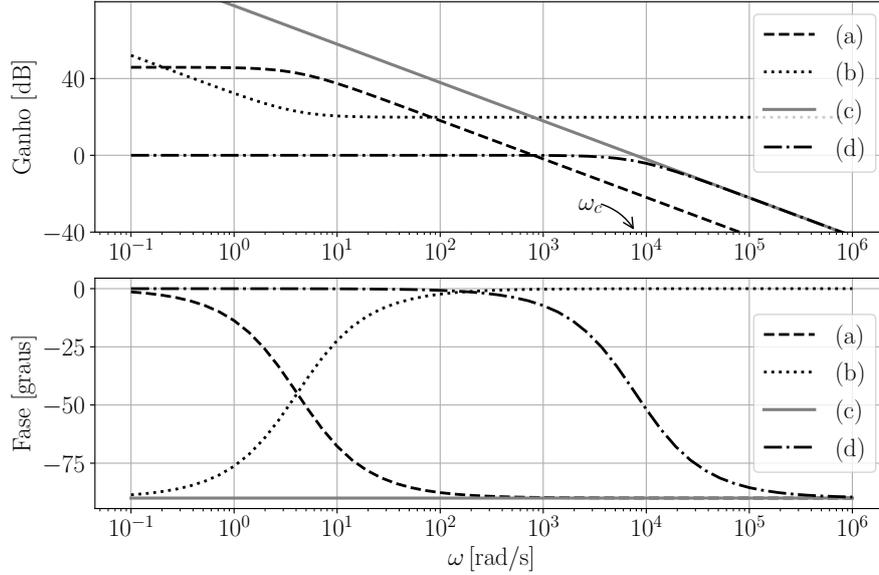


Figura 5.5: curva de ganho dB e de fase das funções de transferência da planta (a), do controlador proporcional-integral (b), da função de transferência de laço aberto (c) e da função de transferência de malha fechada (d) para as malhas de corrente.

sendo k_ω o coeficiente de inclinação, $\omega_{(j)}^{\text{pu}}$ a frequência angular do gerador correspondente à potência de referência $P_{(j)}^{\text{gen}}$, ω_n^{pu} a frequência angular nominal em pu e P^{nom} a potência nominal.

No capítulo anterior, é indicado que as referências de potência dos geradores, em determinado período, apresentam valores diferentes quanto à operação em paralelo, o que levaria a não compartilhamento de carga. Com isso, se inclui ajuste dos valores de referência, de modo que os valores de $\omega_{(j)}^{\text{pu}}$ sejam iguais para os geradores que operam em paralelo, conforme (5.3).

A Figura 5.6 mostra o bloco de configuração de frequência ω_{123} que possui as potências dos geradores P_{123}^{gen} e seus estados u_{123} .

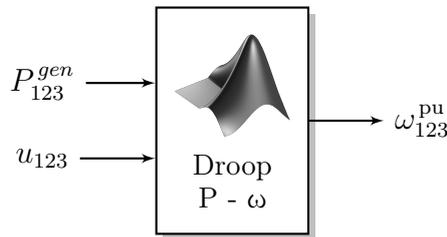


Figura 5.6: m -function do droop de potência/frequência.

Com o propósito de ilustrar o *script* do droop, mostrado na Figura 5.6, a Figura 5.7 detalha, por meio de blocos, a obtenção das frequências dos geradores.

Com relação a controle de tensão, é usado controlador próprio do *simulink* que inclui controle de excitação. O valor de referência é configurado em 1pu.

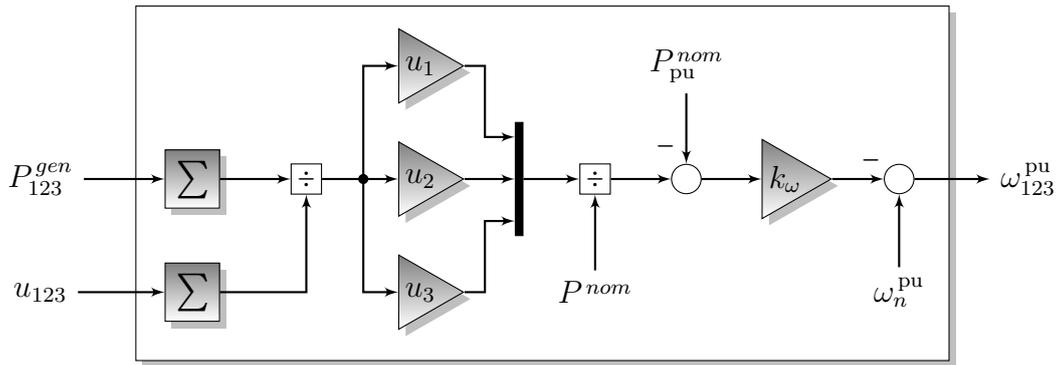


Figura 5.7: diagrama de blocos correspondente ao *script* do *droop*.

5.5 Execução da operação

5.5.1 Dados de inicialização

A Figura 5.8 mostra a configuração completa da microrrede, a qual é composta por três geradores síncronos de 1MW-460V, sistema de armazenamento de 400kW-426kWh e carga variável conforme curva de demanda utilizada nos capítulos anteriores.

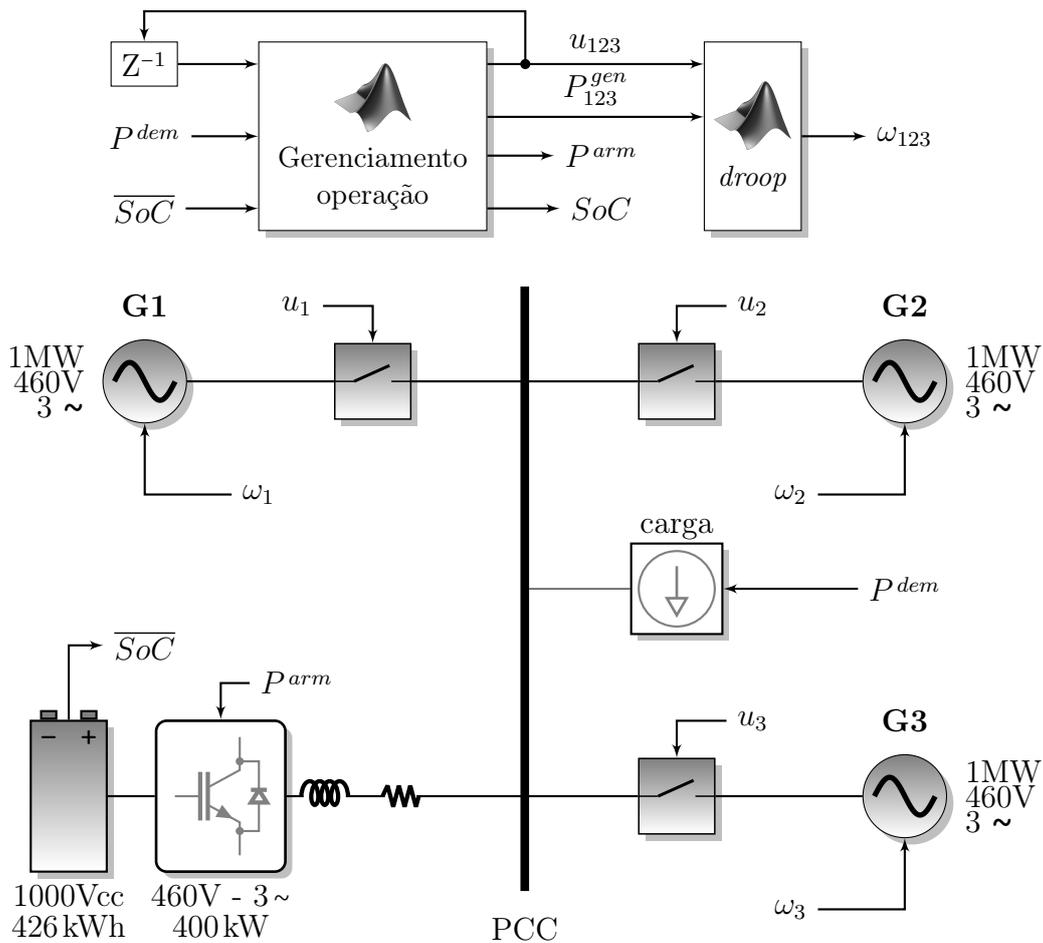


Figura 5.8: *m-function* do gerenciamento da operação, *m-function* do *droop*, geradores, armazenamento, disjuntores e carga da microrrede.

São utilizados geradores síncronos com controle de tensão feito por meio de bloco configurado do *simulink* com referência de tensão de 1pu. Em relação ao controle de velocidade, é usado *droop* com referência em 1pu. O comando para manobra dos disjuntores é feito pelos sinais u_{123} .

Em termos de configuração do bloco do armazenamento, considerando a divisão da curva de demanda de 1 dia em 288 intervalos, ou seja, 5min para cada intervalo, é feita alteração do fator utilizado de 3.600 s para 2,4 s, dentro da máscara do bloco do *simulink*, em referência ao período de 1h relacionado com segundos. Já dentro no bloco de gerenciamento, o valor do intervalo permanece como 1/12 h.

Os dados de entrada considerados no problema são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: dados de inicialização da simulação.

Parâmetro	Valor
Número de geradores da microrrede, N_G	3
Número máximo de geradores em operação, N_G^{max}	2
Número mínimo de geradores em operação, N_G^{min}	1
Potência máxima de operação do geradores, P_{max}^{gen}	1 MW
Potência máxima do armazenamento, P_{max}^{arm}	397,61 kW
Potência mínima do armazenamento, P_{min}^{arm}	-397,61 kW
Capacidade do armazenamento, E_{Wh}^{arm}	426,47 kWh
Estado de carga mínimo, SoC^{min}	20%
Estado de carga máximo, SoC^{max}	85%
Indutância do filtro, L	1,245 mH
Resistência do filtro, R	5 m Ω
Fatores de ponderação, w_{pty} , w_{stu} e w_{std}	1, 270 e 270

Visto que a concepção é elaborada partindo-se da premissa de operação com conversor do armazenamento em modo seguidor de rede, a microrrede deverá operar com pelo menos um gerador conectado ao barramento.

Considerando-se os valores de demanda da instalação, não haveria necessidade de operação de três geradores simultaneamente, bastando-se dois dos geradores para alimentação da carga prevista, admitindo-se o terceiro para redundância do sistema de geração de energia.

As potências máxima e mínima do armazenamento são definidas com base no valor máximo que é obtido no gerenciamento da operação apresentado no capítulo 4. Quanto ao estado de carga, este deverá excursionar dentro da faixa de 20% a 85% de sua capacidade.

5.5.2 Resultado da simulação

Relembrando-se sobre o tempo de execução da simulação, são considerados 288 intervalos de 0,2s, cada um, o que corresponde ao tempo de simulação total de 57,6s.

É feita simulação preliminar do bloco de gerenciamento da operação para avaliar o resultado da otimização com os blocos do circuito de potência e *droop* desabilitados.

Os parâmetros de maior destaque na simulação são os provenientes do gerenciamento da operação, Figura 5.9, os quais são as referências de potência dos geradores e seus estados, potência do armazenamento e controle do estado de carga.

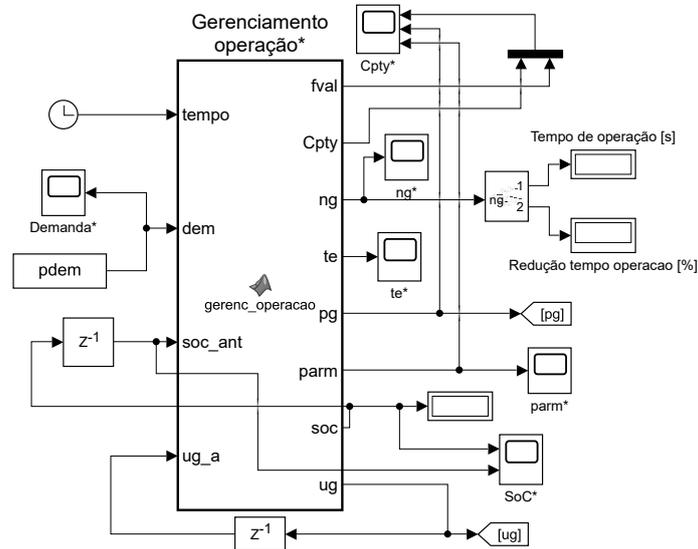


Figura 5.9: *m-function* do gerenciamento da operação no *simulink*.

Em relação aos perfis das referências de potências dos geradores e seus estados, ou curvas de acionamento dos disjuntores dos geradores, apresentados na Figura 5.10, os referidos perfis apresentam boa semelhança com as curvas obtidas no capítulo 4, restando-se diferença nos períodos de 21s a 26s e 46s e 51s, onde o *solver intlinprog* não obtém intermitência nos valores de potência dos geradores.

O tempo de operação dos geradores, 89,8s, somados os tempos de operação de todos os referidos equipamentos, é equivalente ao período apresentado no capítulo anterior, pois mostra proporção semelhante $89,8s/115,2s = 0,779$ em comparação com $37,33h/48h = 0,777$ do referido capítulo.

Em relação à otimização de combustível, é constatado que o gerador com potência associado a P_2^{gen} opera cerca de 58% do tempo de operação em nível de carregamento compatível com o menor consumo específico de combustível, enquanto que o gerador associado a P_3^{gen} trabalha por volta de 77% do tempo de simulação com a mesma característica. Combinando-se a operação de todos os geradores, esses trabalham cerca de 70% do período de simulação em nível de carregamento cujo consumo específico de combustível é mínimo. Por outro lado, o gerador correspondente a P_1^{gen} não é acionado.

Como visto nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, os perfis são bastante semelhantes aos apresentados no capítulo 4, o que corrobora e valida os resultados obtidos, visto que há equivalência em suas formas e mostra que o *solver intlinprog*, para essas

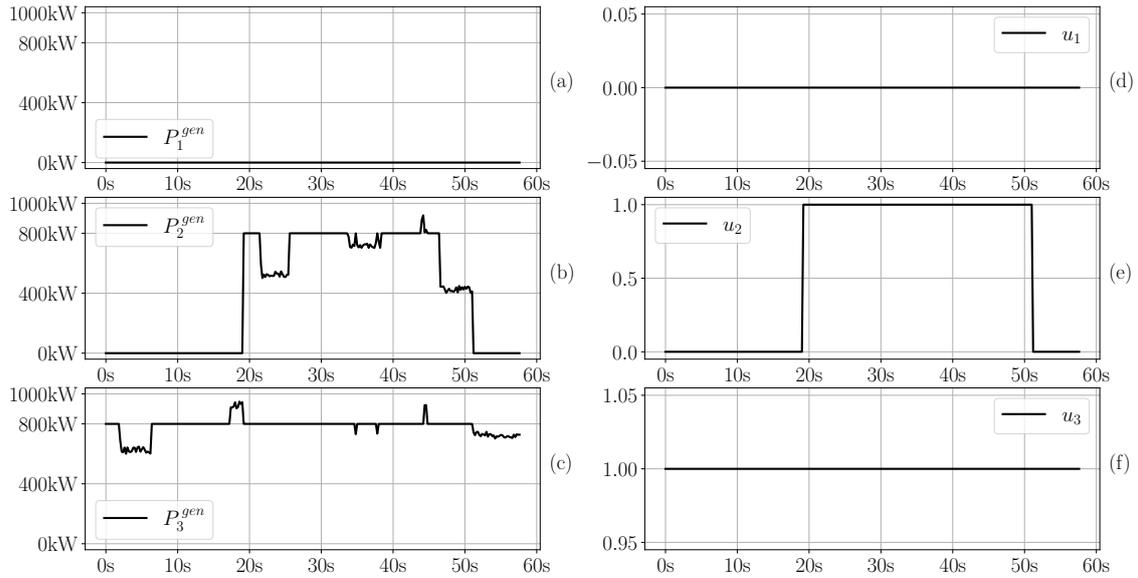


Figura 5.10: curvas das referências de potências dos geradores (a), (b) e (c) e das curvas de acionamento dos disjuntores (d), (e) e (f) provenientes do *m-function* do gerenciamento da operação.

variáveis, acompanha os resultados obtidos pelo CBC, com leve diferença quanto ao tempo de execução do *solver* nas etapas de otimização, porém com valores da mesma ordem de grandeza.

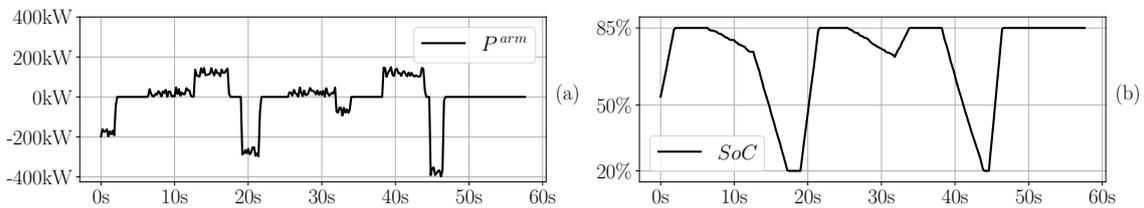


Figura 5.11: curvas da referência de potência do armazenamento (a) e da curva do estado de carga (b) provenientes do *m-function* do gerenciamento da operação.

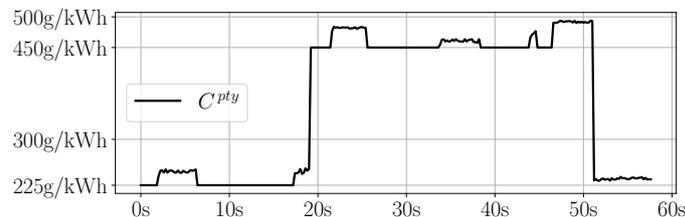


Figura 5.12: valor da parcela custo proveniente do *m-function* do gerenciamento da operação.

Além do bloco *m-function* do gerenciamento da operação, é modelado o bloco *m-function* do *droop* P- ω , Figura 5.14. Por recomendação do *load flow analyser* do

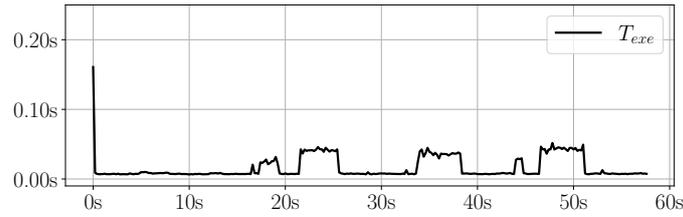


Figura 5.13: curva do tempo de execução das otimizações do *m-function* do gerenciamento da operação.

powergui, inclui-se código em consideração às variáveis ω_{123}^{pu} para que sejam configuradas em zero no intervalo de tempo inicial suficiente para evitar erros numéricos na resolução do modelo.

Como apresentado na Figura 5.10, as referências de potências dos geradores, quando em operação simultânea, mostram que, em certos períodos, possuem valores diferentes. Para possibilitar compartilhamento de potências entre essas fontes, considera-se o valor de potência médio, ou seja, soma de potências dos geradores pelo número de geradores, como valor de referência para o *droop* P- ω .

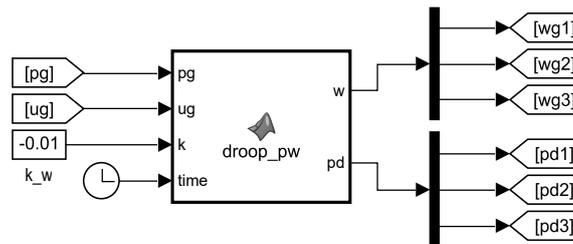


Figura 5.14: *m-function* do *droop* P- ω modelado no *simulink*.

Para o circuito de potência, é feita modelagem dos componentes da microrrede semelhante ao apresentado na Figura 5.8, com conexão de três geradores síncronos, três disjuntores, um para cada gerador, um sistema de armazenamento e cargas correspondentes à curva de demanda considerada na simulação. A Figura 5.15 apresenta o conjunto dos componentes da microrrede modelados no *simulink*.

O conversor do armazenamento, Figura 5.16, é modelado utilizando-se bloco IGBT, com filtro RL. É utilizado modelo de armazenamento tipo lítio-íon, 1000 V, 400 Ah-426 kWh já incluído no *simulink*.

Dentre os parâmetros avaliados na simulação, está a resposta da potência do armazenamento. A Figura 5.17 apresenta as curvas de potência do armazenamento e da referência proveniente do gerenciamento.

Como apresentado na Figura 5.18, o controle de potência responde de forma satisfatória, visto que a potência do armazenamento acompanha a curva de referência e, quanto a transitórios, demonstra velocidade compatível com os critérios de projeto das malhas de corrente. Além disso, mostra perfil semelhante ao apresentado no capítulo anterior, que mostra equivalência entre os *solvers* CBC e *intlinprog*.

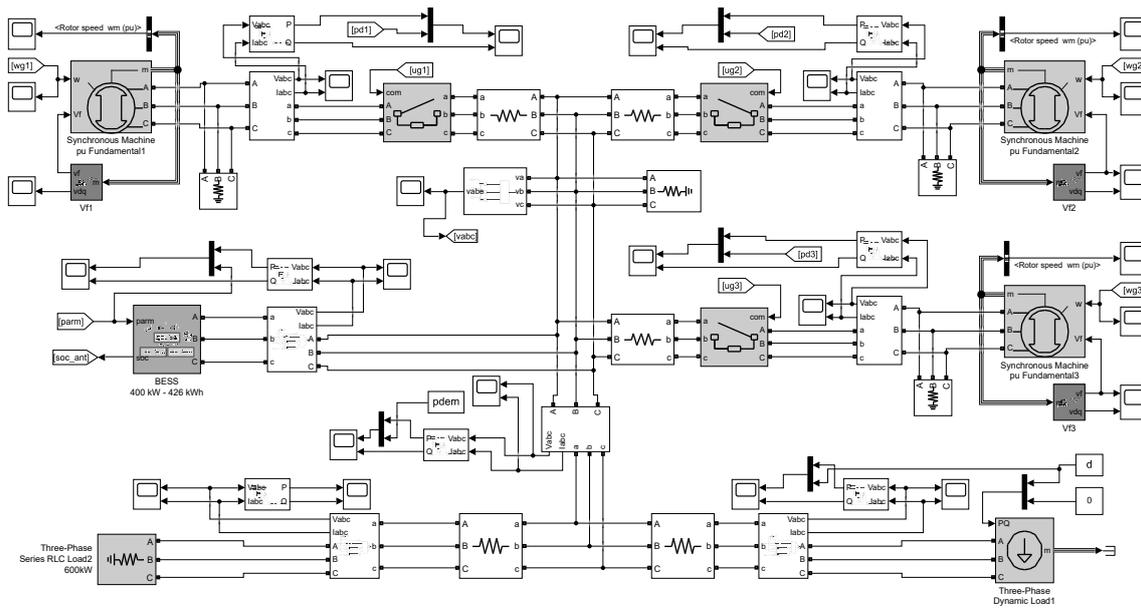


Figura 5.15: microrrede modelada no *simulink* com três geradores de 1MW, um sistema de armazenamento 400 Ah-426 kWh e cargas com demanda variável.

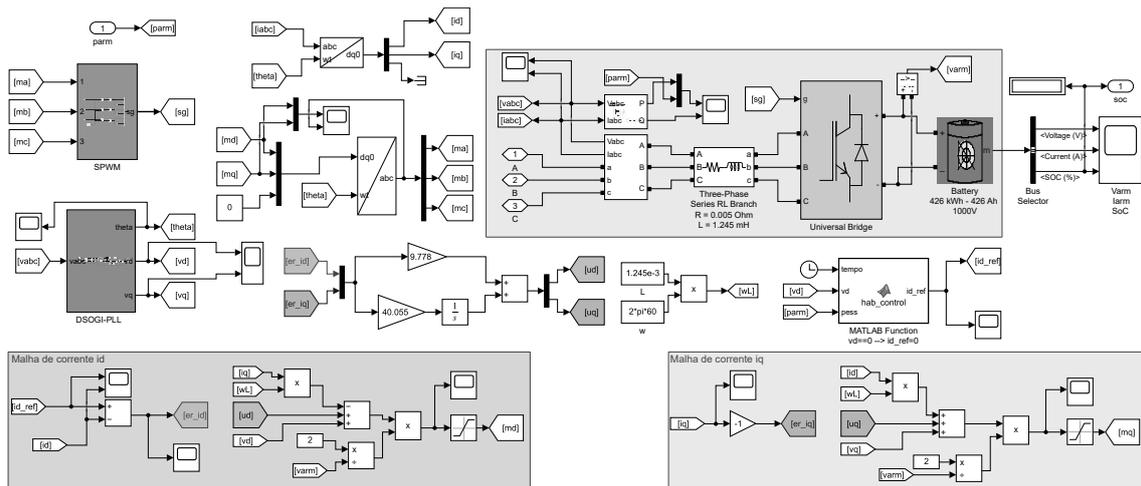


Figura 5.16: conversor do armazenamento com filtro RL e bateria tipo lítio-íon, malhas de controle de corrente de eixo direto e de eixo em quadratura e DSOGI-PLL modelados no *simulink*.

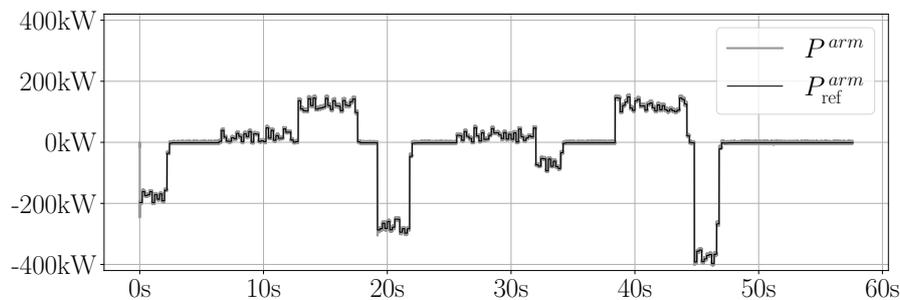


Figura 5.17: curva de potência ativa do armazenamento P^{arm} e sua referência P_{ref}^{arm} .

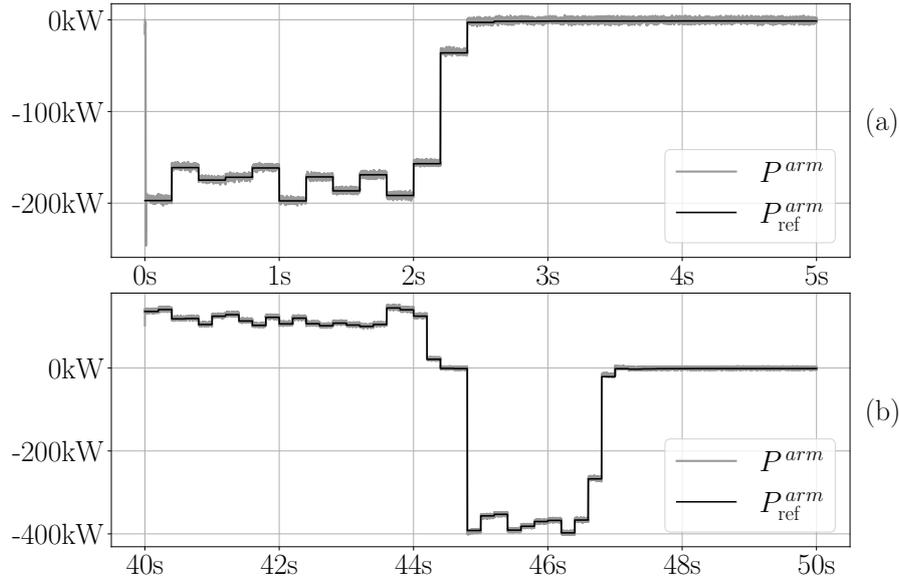


Figura 5.18: detalhes da curva de potência do armazenamento nos intervalos (a) 0s a 5s e (b) 40s a 50s.

As tensões de eixo direto e de eixo em quadratura dq -frame, Figura 5.19, vista pelo conversor no PCC, apresenta comportamento estável apesar dos transitórios de carga, da aplicação de potência do armazenamento e nos instantes de conexão e de desconexão de geradores.

Considerando-se que a modelagem dq -frame do conversor possui forte influência da tensão de eixo direto medida no ponto comum de conexão dos equipamentos da microrrede, o controle das correntes apresenta resposta satisfatória, visto que a corrente do armazenamento, Figura 5.20, apresenta perfil em sintonia com o descrito pela curva de potência do conversor, em virtude de tensão estabilizada no ponto de conexão dos equipamentos.

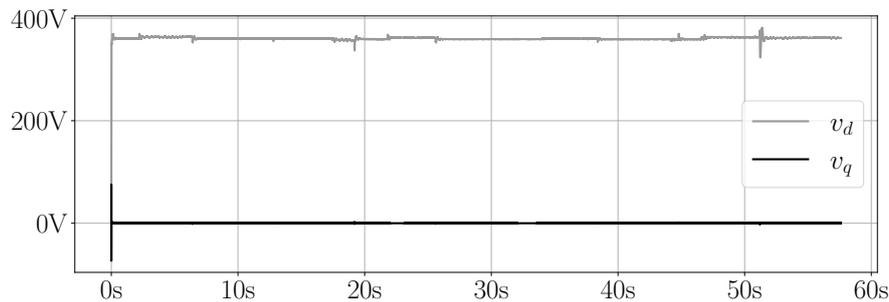


Figura 5.19: tensão de eixo direto v_d e de eixo em quadratura v_q no ponto comum de conexão dos componentes da microrrede.

Como visto nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23, as potências apresentam boa dinâmica em relação às referências do gerenciamento, embora haja indicação de transitório significativo nos instantes de transição de demanda e manobra de disjuntores de geradores.

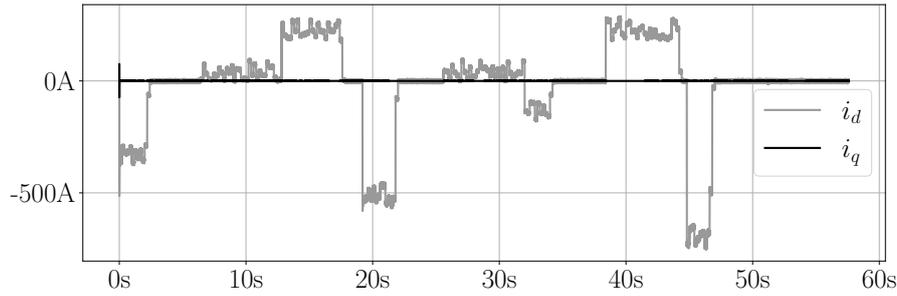


Figura 5.20: corrente de eixo direto i_d e de eixo em quadratura i_q do sistema de armazenamento.

Outro ponto relevante, é o efeito do controle de excitação dos geradores síncronos que causa diferenças nos módulos das tensões dos geradores, condição que provoca circulação de potência reativa entre os geradores e pequeno *offset* das potências ativas e suas referências.

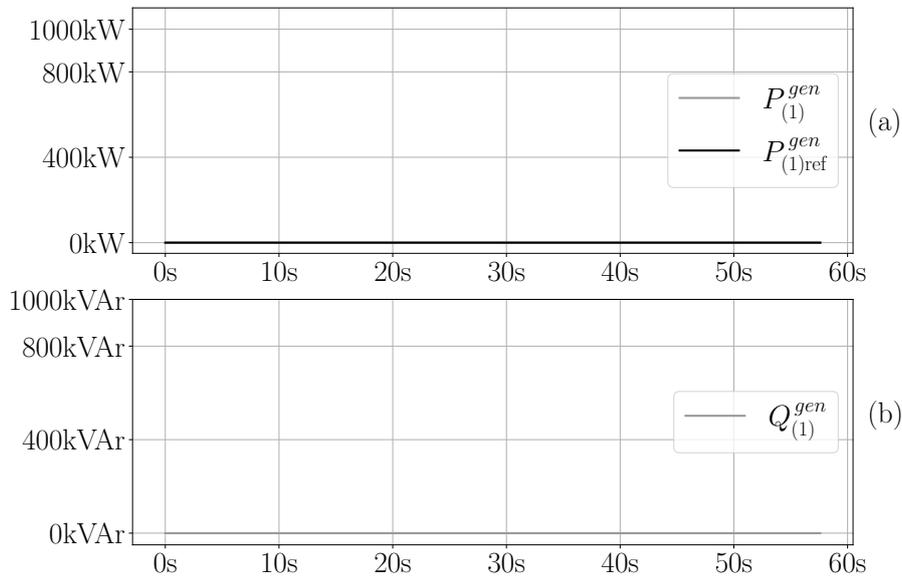


Figura 5.21: (a) potência ativa $P_{(1)}^{gen}$, potência ativa de referência $P_{(1)ref}^{gen}$ e (b) potência reativa $Q_{(1)}^{gen}$ do gerador 1.

Como constatado na Figura 5.24, o valor medido do estado de carga acompanha a curva do seu valor calculado no gerenciamento. Portanto, o controle do estado de carga do armazenamento ocorre de forma satisfatória como aproveitamento do gerenciamento de operação da microrrede, sem necessidade de incluir estágio de controle, no domínio da frequência, para o circuito de corrente contínua.

O perfil de potência da carga, Figura 5.25, mostra que o modelo utilizado para representar a demanda do navio é coerente com o nível de potência considerado no gerenciamento e acompanha a referência utilizada na inicialização da otimização, apesar do *offset* de potência provocado por pequena redução de tensão no PCC.

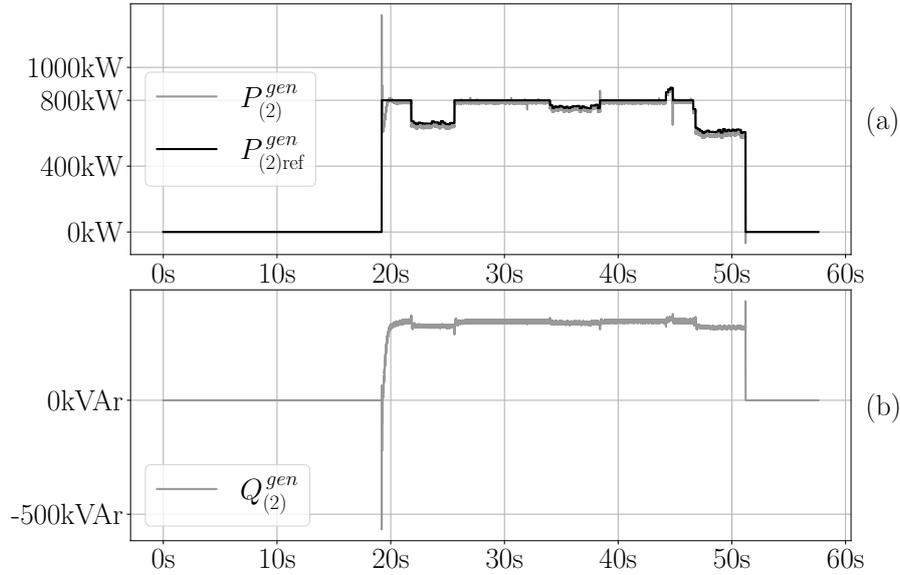


Figura 5.22: (a) potência ativa $P_{(2)}^{gen}$, potência ativa de referência $P_{(2)ref}^{gen}$ e (b) potência reativa $Q_{(2)}^{gen}$ do gerador 2.

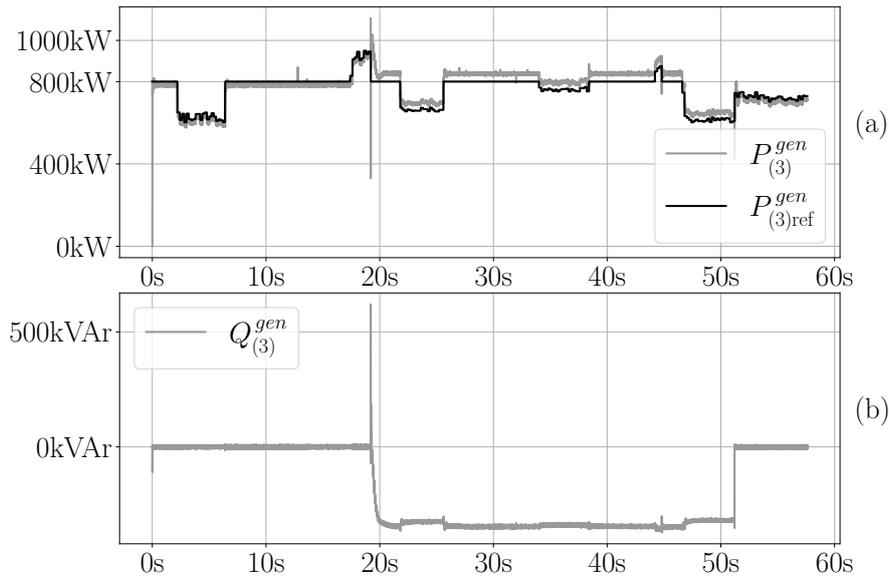


Figura 5.23: (a) potência ativa $P_{(3)}^{gen}$, potência ativa de referência $P_{(3)ref}^{gen}$ e (b) potência reativa $Q_{(3)}^{gen}$ do gerador 3.

5.6 Conclusões parciais

As seções desse capítulo mostram configurações dos geradores e sistema de armazenamento para operação otimizada da microrrede, considerando-se melhores níveis de aproveitamento de combustível, tempo de operação e menor quantidade de manobras de partida e de parada dos geradores diesel.

A sincronização é feita por meio de um DSOGI-PLL que mostra desempenho satisfatório ao permitir melhor condição do conversor em entregar as potências deman-

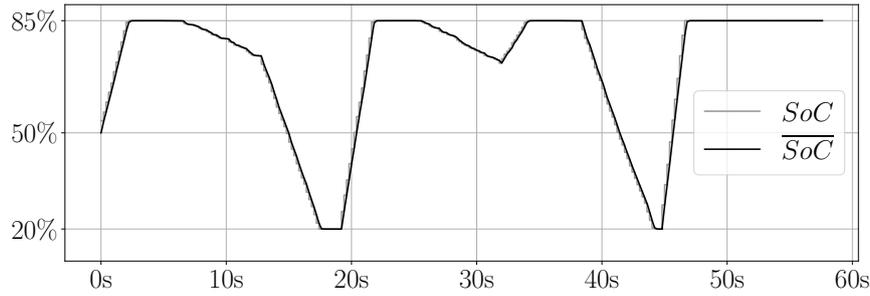


Figura 5.24: estado de carga calculado SoC e real \overline{SoC} do armazenamento.

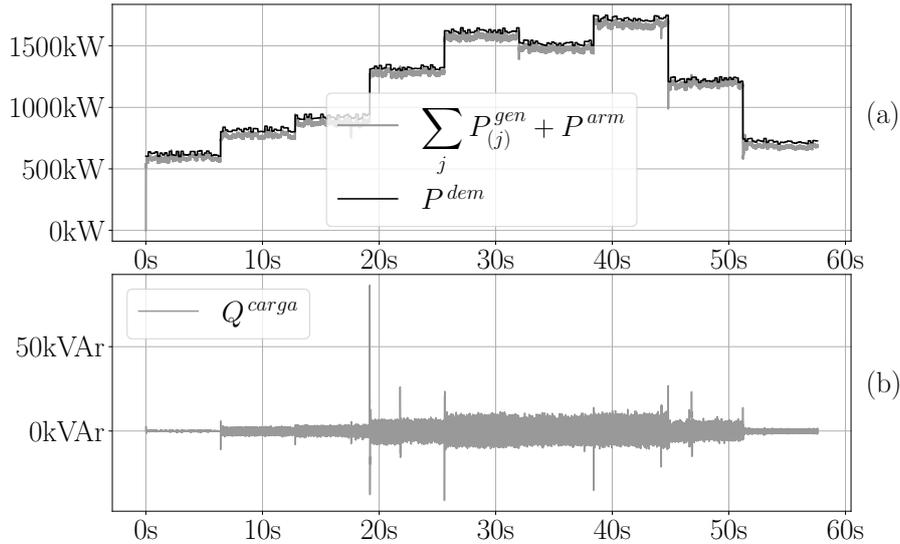


Figura 5.25: (a) potência da carga P^{dem} , potência ativa $\sum_j P_{(j)}^{gen} + P^{arm}$ das fontes e (b) potência reativa da carga da microrrede.

dadas pelo gerenciamento, visto que as tensões de eixo direto e eixo em quadratura rastreados pelo PLL permanecem estabilizadas durante toda a simulação.

O gerenciamento, implementado por meio de otimização de função objetivo cujas parcelas são custo por consumo de combustível, comando de partida e comando de parada, mostra que as referências estão em níveis alinhados com o melhor rendimento dos motores diesel.

Com relação ao controle primário dos geradores, é incluído controle *droop* para compartilhamento de potência ativa dos geradores. Por outro lado, se estabelece tensão de 1 pu como referência do controlador, bloco pronto da biblioteca do *simulink*, de tensão dos geradores.

Em certos momentos, as potências dos geradores apresentam transitórios relevantes, principalmente provocados pela referência aplicada. Vislumbra-se que melhoria poderia ser executada na otimização de modo a contemplar restrição de rampa de potência para limitação das referências provenientes do gerenciamento. Por outro lado, com essa medida, poderá haver degradação dos resultados da otimização.

Além disso, o gerenciamento permite controle do estado de carga do armazenamento sem necessidade de nova modelagem de controle da tensão do armazenamento.

Em relação ao armazenamento, a simulação mostra que o conversor e a bateria respondem satisfatoriamente à referência, onde o estado de carga acompanha o valor calculado pelo gerenciamento de potências.

Não há indicação de instabilidade do sistema visto que as fontes não apresentam anormalizadas em relação à entrega de potência ativa definida pelo gerenciamento, embora haja transitórios relativamente severos, mas que não contribuem para erros na simulação.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho, é elaborada formulação para dimensionamento de sistema de armazenamento para operação em conjunto com fontes de energia preexistentes em um navio. A referida formulação sintetiza gerenciamento virtual de potências de geradores diesel e do sistema de armazenamento, considerando-se otimização de consumo de combustível, redução de tempo de operação e redução do número manobras de geradores. A inclusão da variável de capacidade de armazenamento causa dificuldade na obtenção da solução do problema, visto que inclui natureza não linear à formulação. Por outro lado, com aplicação de fatores de ponderação adequados para cada tipo de variável na função objetivo, obtém-se convergência na otimização. Com a execução da otimização, obtém-se queda do consumo de combustível em cerca de 400kg/dia, que corresponde a 6%, com redução de mais de 1 ton/dia de emissão de CO₂, diminuição do tempo de operação dos geradores da ordem de 25% e menor número de manobras de partida e de parada, que resulta apenas em 1 comando de partida para cada gerador.

Além de formulação para obtenção da capacidade do armazenamento e gerenciamento virtual da microrrede, é elaborada, no capítulo 4, formulação para operação da microrrede, com objetivo de redução de consumo de combustível e de número de manobras de partida e de parada dos geradores, de uma microrrede com geradores com as mesmas especificações do capítulo anterior e com inclusão da capacidade de armazenamento de energia obtida no referido capítulo. Como visto, não são incluídas parcelas de potência e estado de operação na função objetivo, em virtude de que a parcela de custo de combustível já possui essas variáveis, e, portanto, já estão inseridas no modelo da função, e quanto ao estado de operação, haveria pouca representatividade da variável em relação à minimização da função objetivo.

O resultado obtido na otimização do capítulo 4 é semelhante ao do capítulo 3, apresentando-se redução de consumo de combustível, redução do tempo de operação dos geradores diesel, número reduzido de manobras de partida e de parada com a mesma ordem de grandeza dos valores.

Pode-se observar nas otimizações que em virtude da inclusão do sistema de armazenamento, a microrrede apresenta geradores em operação com rendimento otimizado ou próximo ao otimizado, além de evitar partida de outra fonte de energia convencional por meio de entrega de potência para aplicar o *peak shaving* ou no carregamento para aproveitamento de disponibilidade de potência em virtude de baixa demanda de carga.

O capítulo 5 mostra configuração para gerenciamento de potências por meio de *script* matlab, usando-se a função `intlinprog`, especificação dos componentes da microrrede, modo de sincronização do conversor do armazenamento, modelagem da malha de controle do referido conversor, configuração das máquinas síncronas utilizadas como geradores de convencionais e modelagem da microrrede no *simulink*. As fontes de energia seguem as referências de potência provenientes do gerenciamento, porém com transitórios significativos, mas o conversor apresenta sintonia com a referência do gerenciamento e não há anormalidades na operação dos geradores.

Foi cogitado uso de filtros de atraso nos sinais de referência de potência do armazenamento e dos geradores para reduzir os transitórios de potência e de tensão. Esse ajuste não é aplicado, visto que essa medida poderia comprometer a convergência do *solver*, pois se obteria estado de carga realimentado com valor fora da faixa prevista pelo algoritmo nos passos anteriores, condição que poderia gerar erros numéricos na otimização.

Apesar dos dados favoráveis das formulações elaboradas para o dimensionamento do armazenamento por meio de gerenciamento virtual, capítulo 3, e por meio de gerenciamento da operação, capítulo 4 e 5, vislumbra-se embarque dos códigos em microcontrolador para implementação *hardware-in-the-loop* e melhorias nos modelos para contribuir na complementação das análises, com inclusão de modelos de estimativa do estado operacional do armazenamento (SoH) para minimizar sua degradação, rampa limite de variação de potências, de modo a prevenir transitórios não aceitáveis na microrrede, inclusão de potências reativas na formulação do problema, considerando-se perdas por condução de potência reativa e inclusão de melhorias no controle de tensão dos geradores.

Referências Bibliográficas

- [1] BOVERI, A., SILVESTRO, F., MOLINAS, M., et al. “Optimal Sizing of Energy Storage Systems for Shipboard Applications”, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 34, n. 2, pp. 801–811, 2019. ISSN: 1558-0059. doi: 10.1109/TEC.2018.2882147.
- [2] MUTARRAF, M. U., TERRICHE, Y., NIAZI, K. A. K., et al. “Energy storage systems for shipboard microgrids—A review”, Energies, v. 11, n. 12, pp. 3492, 2018.
- [3] ZAHEDI, B., NORUM, L. E. “Modeling and Simulation of All-Electric Ships With Low-Voltage DC Hybrid Power Systems”, IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, n. 10, pp. 4525–4537, 2013. doi: 10.1109/TPEL.2012.2231884.
- [4] KHAN, K. S. Methodology to economically dispatch hybrid isolated offshore power systems. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2023.
- [5] WANG, X. “Optimization strategy of DSOGI-PLL precision under harmonic interference conditions”. In: 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), pp. 852–857, 2020. doi: 10.1109/iSPEC50848.2020.9351264.
- [6] YAZDANI, A., IRAVANI, R. “Grid-Imposed Frequency VSC System: Control in dq -Frame”. In: Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications, cap. 8, pp. 204–244, Ontario, John Wiley & Sons, Inc, 2010. doi: 10.1002/9780470551578.ch8.
- [7] FABER, J., HANAYAMA, S., ZHANG, S., et al. Fourth IMO GHG study 2020. Relatório técnico, International Maritime Organization, London, 2021. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>>. Acesso em: 20.07.2022.

- [8] TARASIUK, T., JAYASINGHE, S. G., GORNIK, M., et al. “Review of Power Quality Issues in Maritime Microgrids”, IEEE Access, v. 9, pp. 81798–81817, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3086000.
- [9] ON TRADE, U. N. C., STAFF, U. N. P. Review of Maritime Transport 2015. Palais des Nations, CH-1211 Geneva 10, Switzerland, Rowman & Littlefield Publishers, Incorporated, 2015. ISBN: 9789211128925.
- [10] WORLD TRADE ORGANIZATION. World Trade Statistical Review 2016. Relatório técnico, World Trade Organization, 2016. Disponível em: <https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/wts2016_e/wts2016_e.pdf>. Acesso em: 08.08.2023.
- [11] SUN, Y., XU, Q., YUAN, Y., et al. “Optimal Energy Management of Fuel Cell Hybrid Electric Ships Considering Fuel Cell Aging Cost”. In: 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia, pp. 240–245, 2020. doi: 10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208534.
- [12] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA DO BRASIL. “Fatores de emissão”. jul. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2030/estudos-de-apoio/fatores_de_emissao.xlsx/view>. Acesso em: 08/2023.
- [13] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÕES DO BRASIL. “Método da análise de despacho - Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho”. 2021. Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html>. Acesso em: 08.2023.
- [14] YANG, R., ZHANG, W. “Research on Modeling and Simulation of New Energy Ship Power System”. In: 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), pp. 1288–1292, Changsha, China, 2019. IEEE. ISBN: 978-1-7281-3138-2. doi: 10.1109/EI247390.2019.9062149.
- [15] YANG, R., JIANG, L., DU, K., et al. “Research and Experimentation on Energy Management System for Inland Diesel-Electric Hybrid Power Ships”. In: 2020 IEEE 8th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), pp. 102–106, 2020. doi: 10.1109/ICCSNT50940.2020.9305003.

- [16] ANVARI-MOGHADDAM, A., DRAGICEVIC, T., MENG, L., et al. “Optimal planning and operation management of a ship electrical power system with energy storage system”. In: IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2095–2099, 2016. doi: 10.1109/IECON.2016.7793272.
- [17] FANG, S., XU, Y., LI, Z. “Joint Generation and Demand-side Management for Shipboard Carbon Capture and Storage System”. In: 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, pp. 1–8, 2019. doi: 10.1109/ICPS.2019.8733353.
- [18] BOICEA, V. A. “Energy Storage Technologies: The Past and the Present”, Proceedings of the IEEE, v. 102, n. 11, pp. 1777–1794, 2014. doi: 10.1109/JPROC.2014.2359545.
- [19] TEYMOURFAR, R., FARIVAR, G., IMAN-EINI, H., et al. “Optimal stationary super-capacitor energy storage system in a metro line”. In: 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), pp. 1–5, 2011. doi: 10.1109/EPECS.2011.6126828.
- [20] YANG, B., PAN, J., ZHU, Y., et al. “A Review of Energy Storage System Study”. In: 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), pp. 2858–2863, 2020. doi: 10.1109/EI250167.2020.9347297.
- [21] RAHMANI-ANDEBILI, M. “Grid-Connected and Off-Grid Operation of a Microgrid Applying Fuzzy Mixed-Integer Linear Programming”. In: 2022 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), pp. 1–5, 2022. doi: 10.1109/PECI54197.2022.9744047.
- [22] MAZAIRAC, W., SALENBIEN, R., DE VRIES, B. “Mixed-integer linear program for an optimal hybrid energy network topology”. In: 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 861–866, 2015. doi: 10.1109/ICRERA.2015.7418533.
- [23] COELHO, H. A., CORRÊA, A. A. Relatório de qualidade do meio ambiente. techreport, IBAMA, 2022. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/index.php?codigo_sophia=139603>. Acesso em: 17.12.2023.
- [24] ABOOKAZEMI, K., MUSTAFA, M. W. “Unit Commitment optimization using improved Genetic Algorithm”. In: 2009 IEEE Bucharest PowerTech, pp. 1–6, 2009. doi: 10.1109/PTC.2009.5282117.

- [25] CHANG, G. W., CHUANG, G. S., LU, T. K. “A simplified combined-cycle unit model for mixed integer linear programming-based unit commitment”. In: 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1–6, 2008. doi: 10.1109/PES.2008.4596496.
- [26] XI, Y., SONG, B., LI, W., et al. “Impact of Energy Storage on Security-Constrained Unit Commitment of Power System with Wind Power Integration”. In: 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), pp. 988–993, 2020. doi: 10.1109/EI250167.2020.9347377.
- [27] DIPAN BISWAS, B., KAMALASADAN, S., PAUDYAL, S. “A Two-Stage Combined UC-OPF Model Using Mixed Integer and Semi-Definite Programming”. In: 2021 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), pp. 1–5, 2021. doi: 10.1109/ISGT49243.2021.9372168.
- [28] HAN, D., JIAN, J., YANG, L. “Outer Approximation and Outer-Inner Approximation Approaches for Unit Commitment Problem”, IEEE Transactions on Power Systems, v. 29, n. 2, pp. 505–513, 2014. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2253136.
- [29] KANELLOS, F. D., TSEKOURAS, G. J., HATZIARGYRIOU, N. D. “Optimal Demand-Side Management and Power Generation Scheduling in an All-Electric Ship”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 5, pp. 1166–1175, 2014. ISSN: 1949-3037. doi: 10.1109/TSTE.2014.2336973.
- [30] PREMKUMAR, R., SHANMUGASUNDARAM, R., THILAK, K. R., et al. “A Review on Demand Side Management: Definition, Scope, Challenges and Benefits”. In: 2022 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS), pp. 1–4, 2022. doi: 10.1109/ICSSS54381.2022.9782161.
- [31] WYNN, S. L. L., BOONRAKSA, T., MARUNGSRI, B. “Optimal Generation Scheduling with Demand Side Management for Microgrid Operation”. In: 2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), pp. 41–44, Pattaya, Thailand, 2021. IEEE. ISBN: 978-1-7281-9585-8. doi: 10.1109/iEECON51072.2021.9440356.
- [32] LUENBERGER, D. G., YE, Y. Linear and Nonlinear Programming. Fifth ed. Stanford, CA, USA, Springer, 2021. ISBN: 9783030854508.

- [33] KERDPHOL, T., QUDAIH, Y., MITANI, Y. “Battery energy storage system size optimization in microgrid using particle swarm optimization”. In: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, pp. 1–6, 2014. doi: 10.1109/ISGTEurope.2014.7028895.
- [34] IGNAT, A., LAZAR, E., PETREUS, D. “Energy Management for an Islanded Microgrid Based on Particle Swarm Optimization”. In: 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 213–216, 2018. doi: 10.1109/SIITME.2018.8599272.
- [35] LITCHY, A. J., NEHRIR, M. H. “Real-time energy management of an islanded microgrid using multi-objective Particle Swarm Optimization”. In: 2014 IEEE PES General Meeting Conference and Exposition, pp. 1–5, 2014. doi: 10.1109/PESGM.2014.6938997.
- [36] ZHANG, H., XIA, L., WANG, G., et al. “Multi-time Scale Energy Management Strategy for Isolated Microgrid”. In: 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 184–189, 2018. doi: 10.1109/ICMA.2018.8484681.
- [37] MAULIK, A., DAS, D. “Determination of optimal size of battery energy storage system (BESS) for a renewable power based microgrid”. In: 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), pp. 1–6, 2020. doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342575.
- [38] SAVASCI, A., INAOLAJI, A., PAUDYAL, S. “Performance Analysis of Mixed-Integer Conic and Mixed-Integer Linear Unit Commitment Models”. In: 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1–5, Montreal, QC, Canada, 2020. IEEE. ISBN: 978-1-7281-5509-8. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281466.
- [39] WANG, P.-C., TSAI, J.-F. “Global optimization of mixed-integer nonlinear programming for engineering design problems”. In: Proceedings 2011 International Conference on System Science and Engineering, pp. 255–259, 2011. doi: 10.1109/ICSSE.2011.5961909.
- [40] DURAN, M. A., GROSSMANN, I. E. “An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs”, Math. Program., v. 36, n. 3, pp. 307–339, 1986. doi: 10.1007/BF02592064.
- [41] NOWAK, I. Relaxation and decomposition methods for mixed integer nonlinear programming, v. 152. Berlin, Springer Science & Business Media, 2005.

- [42] ALSAIDAN, I., KHODAEI, A., GAO, W. “A Comprehensive Battery Energy Storage Optimal Sizing Model for Microgrid Applications”, IEEE Transactions on Power Systems, v. 33, pp. 3968–3980, 2018. ISSN: 1558-0679. doi: 10.1109/TPWRS.2017.2769639.
- [43] HAN, B.-S., YANG, Y.-J. “An Approximate Algorithm for the Mixed Integer Nonlinear Programming”. In: 2012 Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, pp. 433–437, 2012. doi: 10.1109/CSO.2012.101.
- [44] YAHYAIE, F., SOONG, T. “Optimal operation strategy and sizing of battery energy storage systems”. In: 2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), pp. 1–4, Montreal, QC, Canada, 2012. IEEE. ISBN: 978-1-4673-1432-9. doi: 10.1109/CCECE.2012.6334877.
- [45] LAI, K., ILLINDALA, M. S. “Sizing and Siting of Distributed Cloud Energy Storage Systems for a Shipboard Power System”, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 57, pp. 1935–1944, 2021. ISSN: 1939-9367. doi: 10.1109/TIA.2021.3057305.
- [46] BHUJADE, R., KHAMBADKONE, A. M., MAHARJAN, S., et al. “Optimal Operation and Sizing of Energy Storage System for a Ship Electrical Power System”. In: 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), pp. 1–6, Nottingham, UK, 2018. IEEE. ISBN: 978-1-5386-4193-4. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607772.
- [47] BAO, X., XU, X., ZHANG, Y., et al. “Optimal sizing of battery energy storage system in a shipboard power system with considering energy management optimization”, Discrete Dyn. Nat. Soc., v. 2021, pp. 1–12, jul 2021.
- [48] OUDALOV, A., CHERKAOUI, R., BEGUIN, A. “Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application”. In: 2007 IEEE Lausanne Power Tech, pp. 621–625, Lausanne, Switzerland, 2007. IEEE. ISBN: 978-1-4244-2190-9. doi: 10.1109/PCT.2007.4538388.
- [49] HOW, D. N. T., HANNAN, M. A., HOSSAIN LIPU, M. S., et al. “State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review”, IEEE Access, v. 7, pp. 136116–136136, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942213.

- [50] WAN, X., ZHONG, P., MA, W. “Using Pyomo and IPOPT for Optimization of Reservoir Flood Control Operation”. In: 2013 Sixth International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering, pp. 49–52, 2013. doi: 10.1109/BIFE.2013.12.
- [51] BERNAL, D., PENG, Z. “MindtPy Solver”. 2023. Disponível em: https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/contributed_packages/mindtpy.html#solve-convex-minlps. Acesso em: 21.02.2023.
- [52] RUSTEM, B., AKROTIRIANAKIS, I., MAROS, I. “An outer approximation based branch and cut algorithm for convex 0-1 MINLP problems”, Optimization Methods and Software, v. 16, n. 1-4, pp. 21–47, 2001.
- [53] BIEGLER, L., ZAVALA, V. “Large-scale nonlinear programming using IPOPT: An integrating framework for enterprise-wide dynamic optimization”, Computers & Chemical Engineering, v. 33, n. 3, pp. 575–582, 2009. ISSN: 0098-1354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2008.08.006.
- [54] FRANKLIN, G., POWELL, D., NAEINI, A. E. Feedback control of dynamic systems, v. 33. London, Pearson London, 2015.
- [55] BERES, R., WANG, X., BLAABJERG, F., et al. “A review of passive filters for grid-connected voltage source converters”. In: 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, pp. 2208–2215, 2014. doi: 10.1109/APEC.2014.6803611.
- [56] BARBI, I. Projetos de fontes chaveadas. Florianópolis, Edição do autor, 2007.