

Análise de Desempenho da Operação da Microrrede Isolada da Ilha de Lençóis

Orientando: Diego Leonardo Santos Cosme

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez

Coorientador: Prof. Dr. Shigeaki Leite de Lima

Sumário

Introdução

Sistemas de geração

Sistema de armazenamento

Modelagem do sistema

Resultados

Conclusões

Introdução



Justificativa

- Em uma microrrede isolada a dependência é muito maior das fontes de energias renováveis
- Complexidade do gerenciamento da microrrede
- Efeitos negativos sobre o sistema de armazenamento
- Analisar alguns aspectos tais como o tempo de uso do gerador a diesel para realizar o carregamento do banco de baterias
- Novas metodologias para prolongar o tempo de vida útil das baterias

Objetivos do Trabalho

- Modelar e avaliar o desempenho do sistema híbrido da Ilha de Lençóis, visando identificar oportunidades de melhoria nos custos de operação e minimização de emissões.
- Análise de desempenho de operação histórica da microrrede isolada da Ilha de Lençóis
- Realizar análise de sensibilidade de componentes de geração do sistema da microrrede isolada da Ilha de Lençóis
- Identificar situações de melhoria considerando viabilidade econômica da microrrede isolada da Ilha de Lençóis
- Utilizar métodos para otimizar o sistema da microrrede isolada da Ilha de Lençóis.

Ilha de Lençóis

Localização

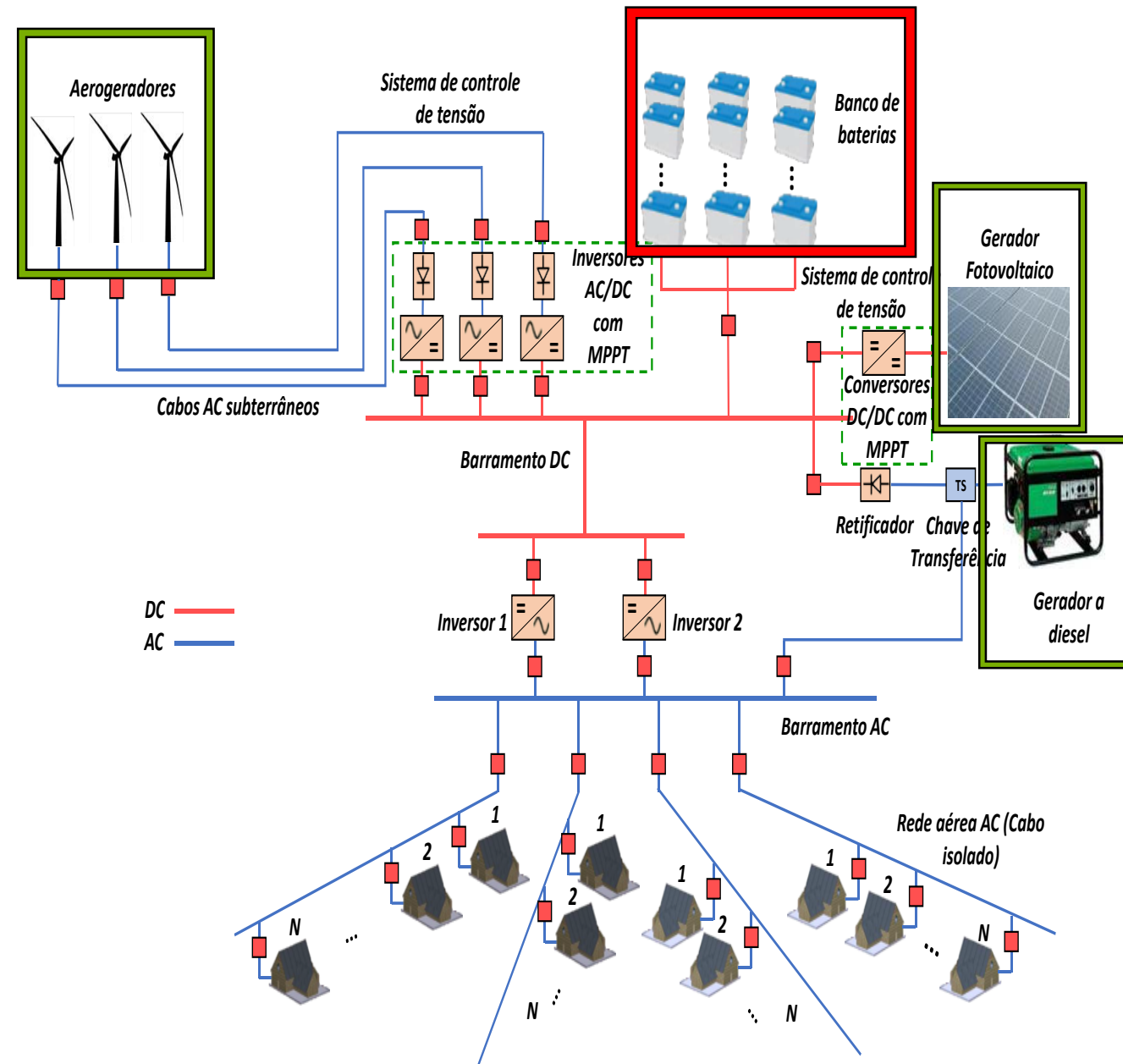
- Município de Cururupu, litoral ocidental do MA
- Faz parte da área de proteção Ambiental das Reentrâncias Maranhenses
- Cerca de 500 habitantes
- Próximo a linha do Equador.

Projeto

- Acesso precário à energia elétrica
- Microrrede com geração Híbrida
- Iniciou em 19/07/2008

Potencial

- Ventos de 7 a 8 m/s
- Elevado potencial de geração solar
- Turístico



Sistemas de Geração



Geração fotovoltaica na Ilha de Lençóis

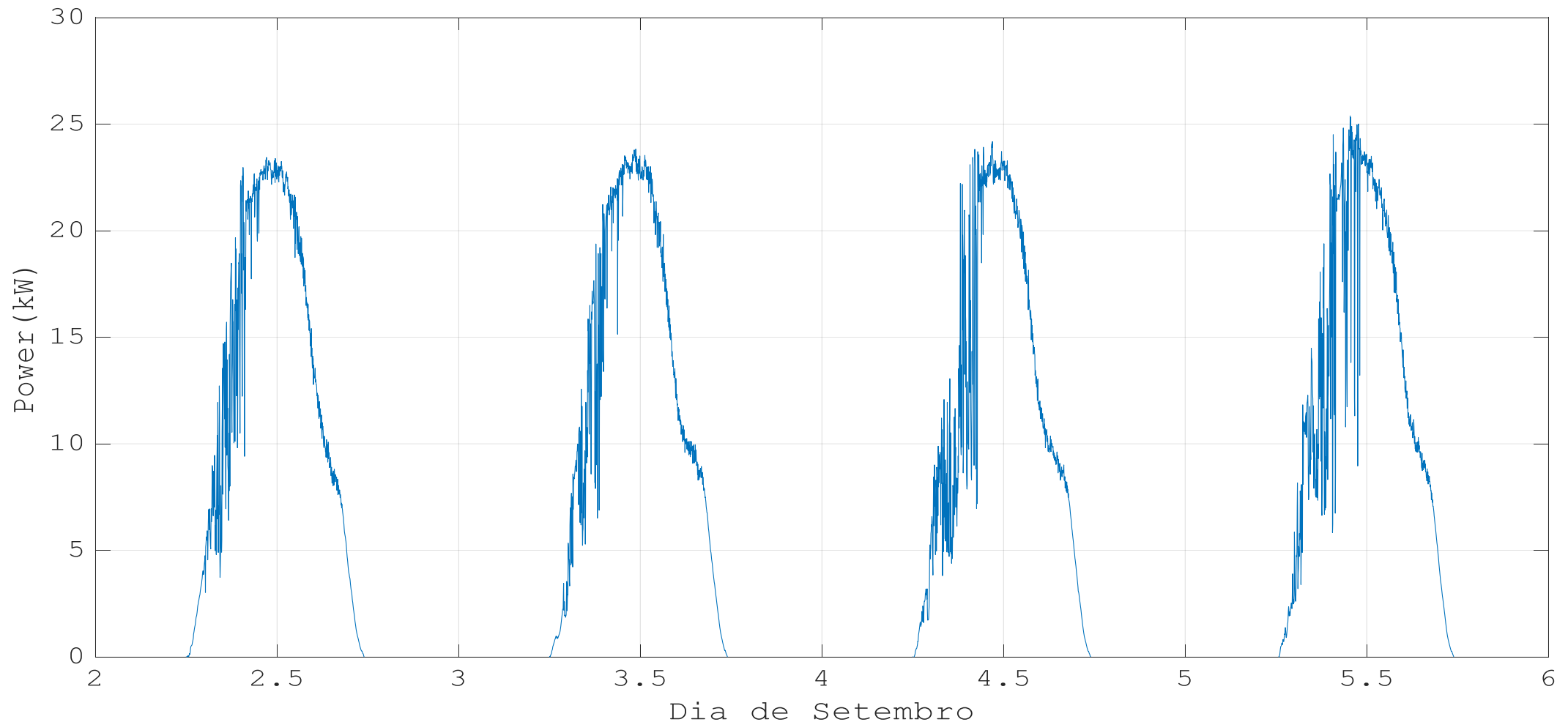
Características do Sistema Fotovoltaico

- 162 módulos são de 130 Wp cada, dispostos em 9 *strings* com 18 módulos
- 98 módulos restantes de 330 Wp, os quais 18 desses estão instalados no telhado da casa onde é localizada o gerador a diesel e os outros 80 estão ao nível do solo.



Geração fotovoltaica na Ilha de Lençóis

Geração fotovoltaica da microrrede de Ilha de Lençóis entre os dias 03 e 06 de Setembro de 2016



Geração fotovoltaica na Ilha de Lençóis

Irradiação solar diária média da Ilha de Lençóis [kWh/m².dia]

Latitude [°]	Longitude [°]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
1,301°S	44,849°O	5,22	4,99	4,77	4,6	4,83
Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5,14	5,25	5,56	5,97	5,77	5,63	5,44

Geração fotovoltaica na Ilha de Lençóis

Mês	Energia Medida (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Fator de Ajuste $\left(\frac{\text{Energia Medida}}{\text{Energia Simulada}}\right)$
Janeiro	3432	3971,5	0,8641
Fevereiro	2520	3429,1	0,7348
Março	2812	3629,3	0,7748
Abril	2993	3391,9	0,8823
Maio	3464	3673,6	0,9429
Junho	3806	3789,3	1,0044
Julho	Sem medições	3994,1	1
Agosto	Sem medições	4230,2	1
Setembro	Sem medições	4399,6	1
Outubro	Sem medições	4390,5	1
Novembro	Sem medições	4151,3	1
Dezembro	3403	4139,3	0,8221

Geração eólica na Ilha de Lençóis

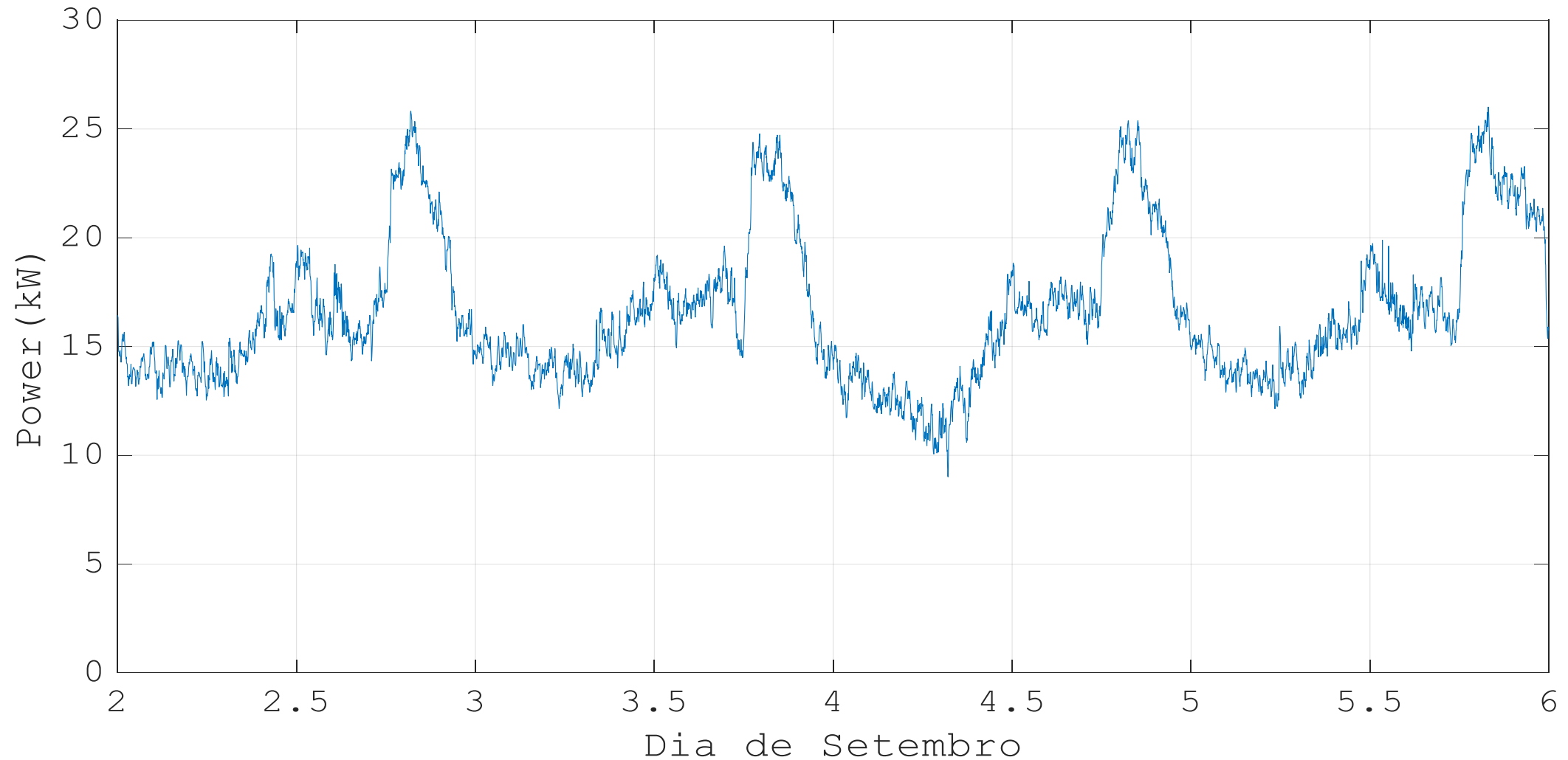
Características do Sistema Eólico

- Potência total instalada de aproximadamente 22,5 kW;
- 3 turbinas, cada uma com 3 pás, modelo BWC EXCEL-R/240, fabricada pela Bergey Wind Power;
- Instaladas a aproximadamente 600 m da casa de controle e próximas a faixa litorânea;
- Cada torre tem altura de 30 m;
- Tipo síncrono de imã permanente e tensão alternada corrigida inicialmente usando retificadores semi-controlados para 240 Vdc para fornecer ao barramento DC.



Geração eólica na Ilha de Lençóis

Geração eólica da microrrede de Ilha de Lençóis entre os dias 03 e 06 de Setembro de 2016



Geração eólica na Ilha de Lençóis

Irradiação eólica diária média da Ilha de Lençóis [kWh/m2.dia]

Latitude [°]	Longitude [°]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
1,317989°S	44,88031°O	0,220			0,119	

Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	0,292			0,441		0,220

Geração eólica na Ilha de Lençóis

Mês	Energia Medida (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Fator de Ajuste $\left(\frac{\text{Energia Medida}}{\text{Energia Simulada}}\right)$
Janeiro	1920	2052,5	0,9354
Fevereiro	1411	1855,6	0,7604
Março	980	1110,3	0,8826
Abril	993	1075,8	0,9230
Maio	1975	1110,2	1,7789
Junho	2709	2638,4	1,0267
Julho	2948	2723,3	1,0825
Agosto	4218	2723,0	1,5490
Setembro	4089	3984,9	1,0261
Outubro	3820	4113,2	0,9287
Novembro	4154	3984,6	1,0425
Dezembro	2030	2052,3	0,9891

Geração à diesel na Ilha de Lençóis

Características do Subsistema à diesel

- Operado quando a geração renovável é insuficiente
- Quando o sistema de geração renovável está em manutenção
- Equalizar o banco de baterias
- Não funcionam simultaneamente
- Combustão de 1L resulta aproximadamente 2,63 Kg CO_2



Geração à diesel na Ilha de Lençóis

Especificação dos GMGs

	Gerador 1				Gerador 2			
Frequência (Hz)	60				60			
Fator de Potência	0,8				0,8			
	Regime de Trabalho							
	Standby		Prime		Standby		Prime	
Potência (kW)	65		59		42		38	
Potência (kVA)	81		73		53		48	
Carga Aplicada (%)	100	25	100	25	100	25	100	25
Consumo Típico (L/hora)	19	13	13	6	13,6	6,4	11,5	4

Geração à diesel na Ilha de Lençóis

$$\textit{inclinação}_{\textit{gerador}} = \frac{\textit{Consumo a 100\%} - \textit{Consumo a 25\%}}{\textit{Potência Prime} - \textit{Potência a 25\%}}$$

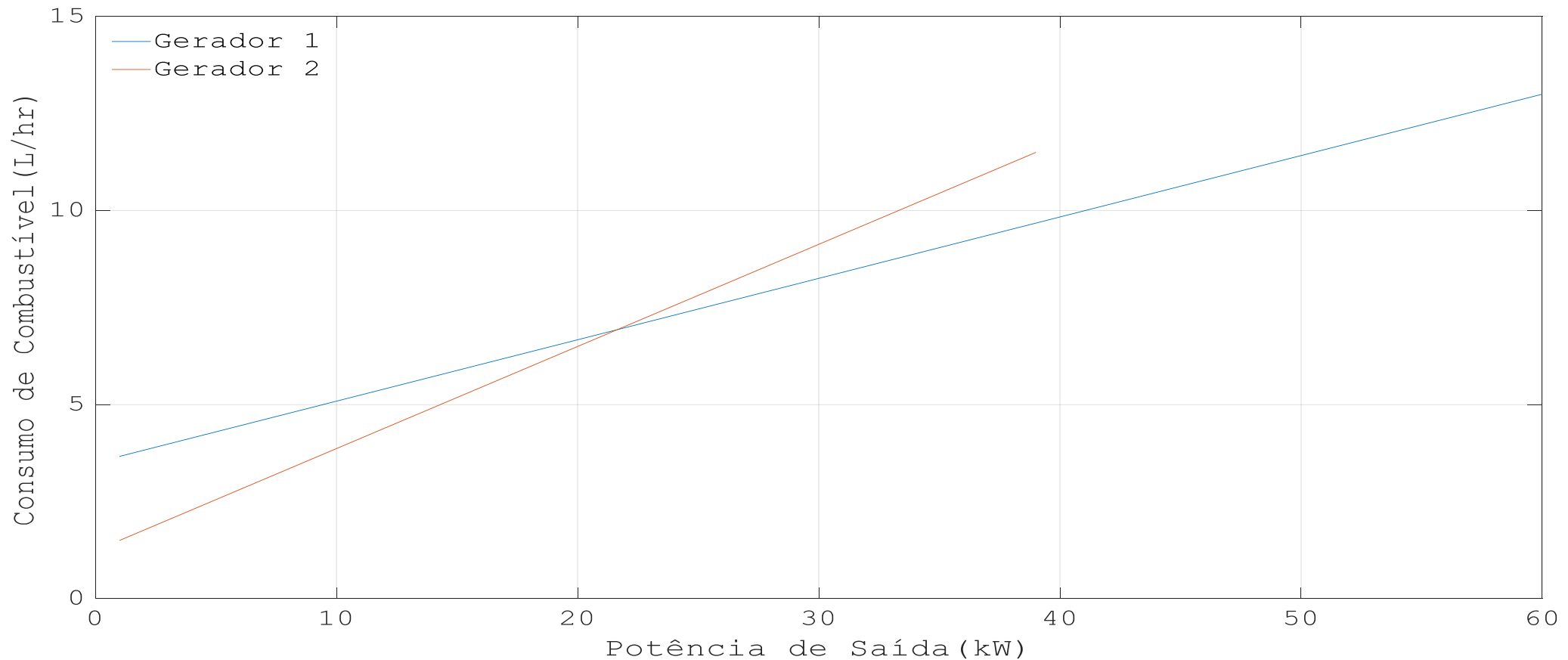
$$\textit{interceptação}_{\textit{gerador}} = \textit{Consumo a 100\%} - \textit{Consumo a 25\%} \times \textit{inclinação}_{\textit{gerador}}$$

$$F_{0\textit{gerador}} = \frac{\textit{interceptação}_{\textit{gerador}}}{\textit{Potencia nominal}_{\textit{gerador}}}$$

Geração à diesel na Ilha de Lençóis

Consumo

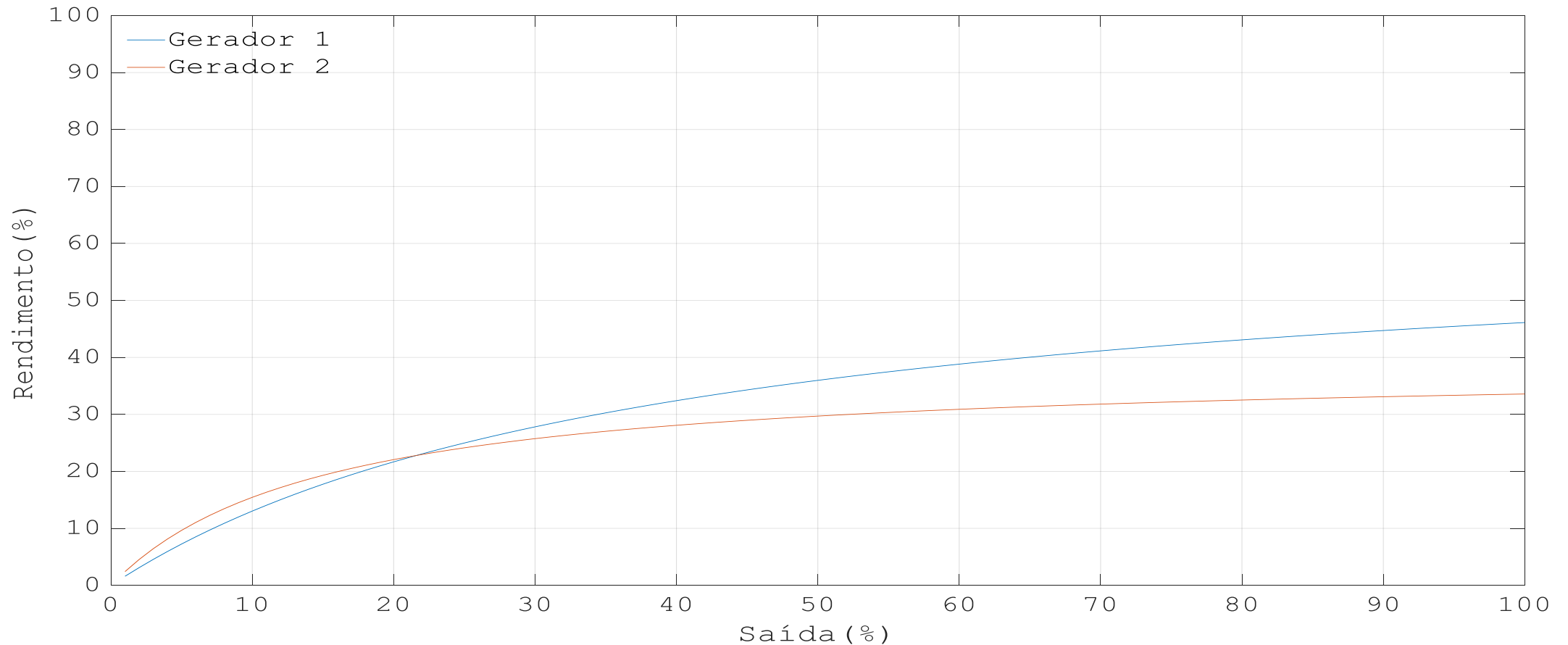
$$F = F_0 Y_{gerador} + F_1 P_{gerador}$$



Geração à diesel na Ilha de Lençóis

Rendimento

$$\eta_{gerador} = \frac{3600P_{gerador}}{(F_o + F_1P_{gerador})\rho_{combustivel}LHV_{combustivel}}$$



Sistema de Armazenamento



Sistema de armazenamento na Ilha de Lençóis

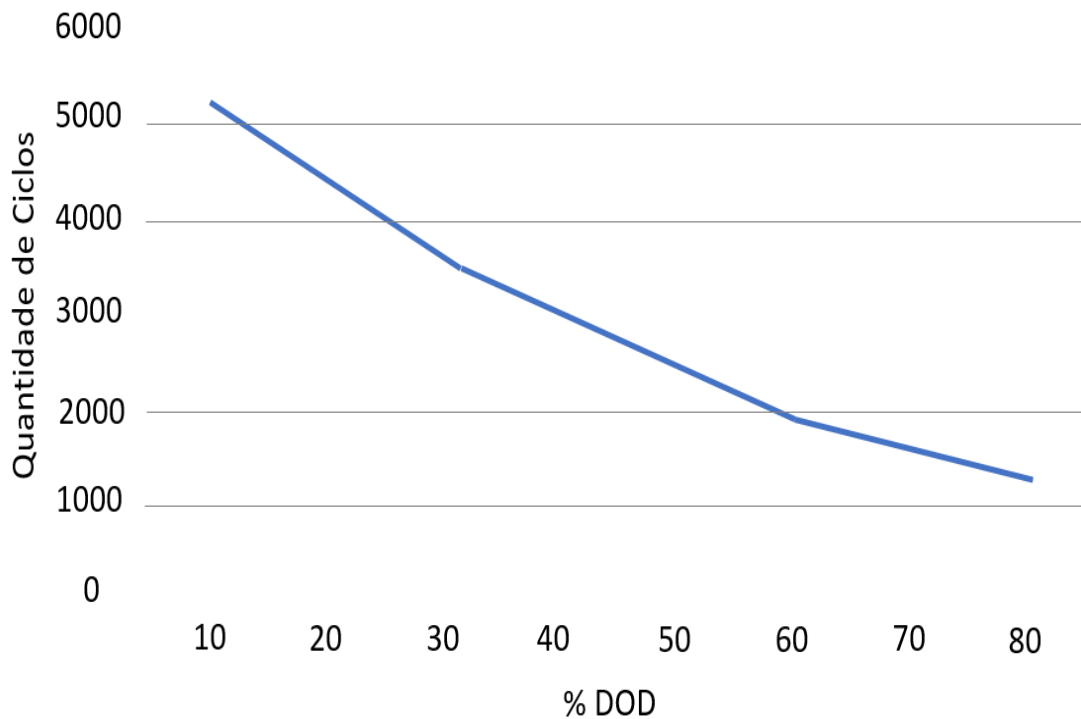
Características do Subsistema de armazenamento

- 2 strings
- 120 baterias/string
- Tensão 2 V e 600 Ah
- 240 V e 288 KWh
- Tensão de equalização por elemento 2,33 V



Sistema de armazenamento na Ilha de Lençóis

Ciclo de vida X Profundidade de descarga



Temperatura X Expectativa de vida

Temperatura (°C)	Expectativa de Vida (Anos)
25	-
30	6
35	4
40	3
45	2
50	1,5

Estimação do estado de carga

Método da tensão em circuito aberto

$$V_{OC}(t) = (a_1 SOC(t)) + a_0$$

V_{OC} : Tensão em circuito aberto no tempo t

a_1 : Tensão da bateria para o $SOC = 100\%$

a_0 : Tensão da bateria para o $SOC = 0\%$

Método da contagem de Coulomb

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_{cap}} \int_t^T I_{Bat} dt$$

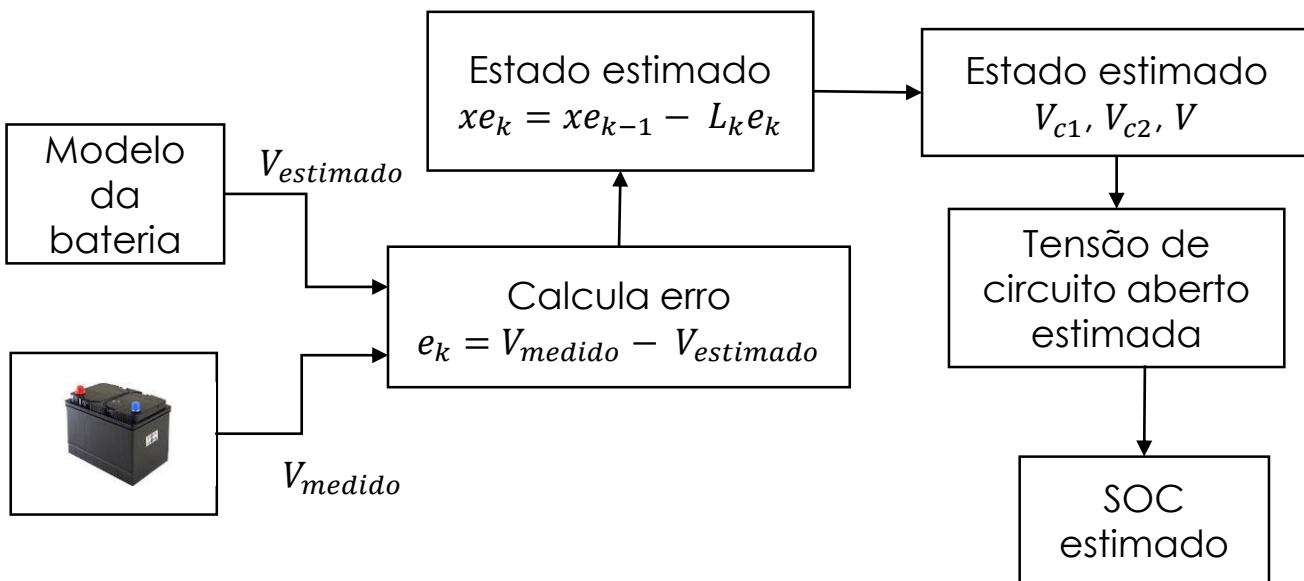
SOC_0 : Valor inicial do SOC

I_{Bat} : Corrente que flui pela bateria

C_{cap} : Capacidade máxima da bateria

Estimação do estado de carga

Método Filtro de Kalman



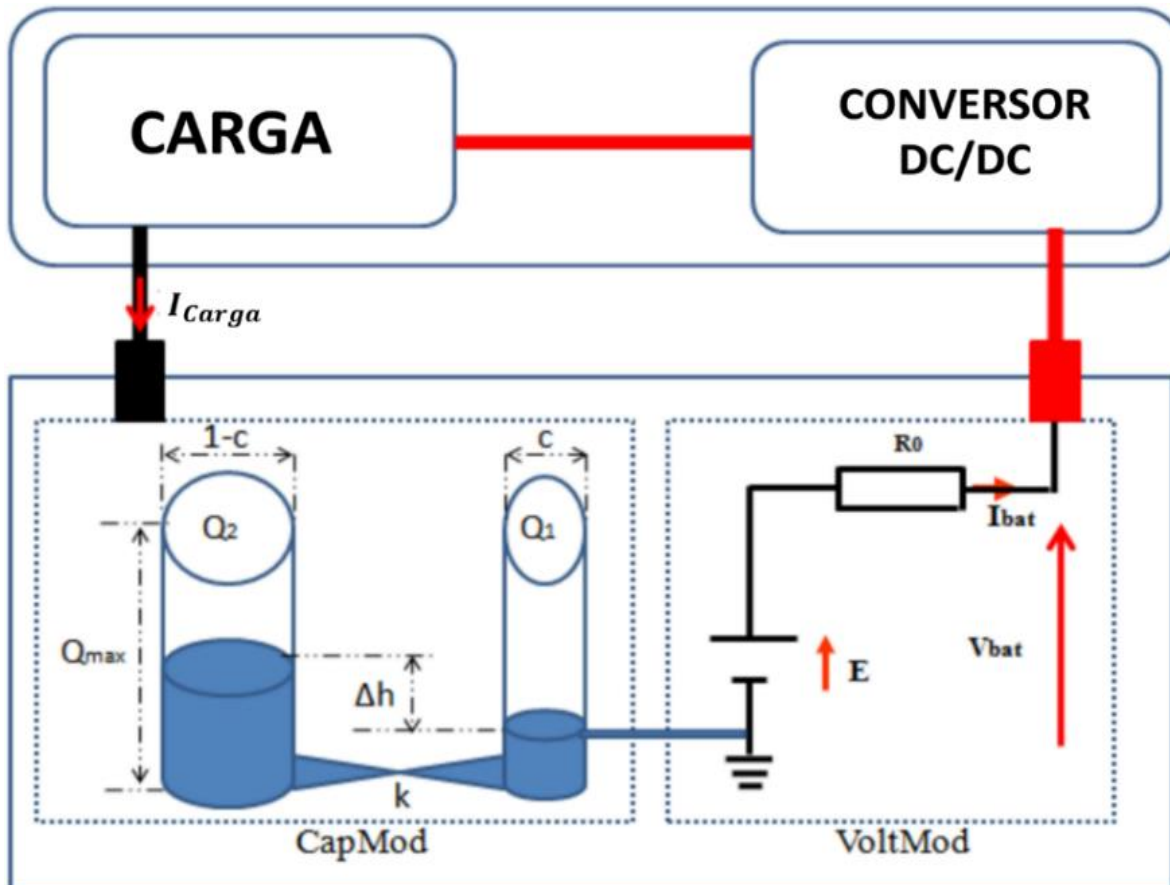
Modelo Schiffer

$$I_{gas} = \frac{C_N}{100} I_{gas,0} \exp(c_u(U - U_{gas,0}) + c_T(T_K - T_{gas,0}))$$

$$SOC(t) = SOC(0) + \int_0^t \frac{I(\tau) - I_{gas}(\tau)}{C_N} d\tau$$

Estimação do tempo de vida útil

Modelo KiBam



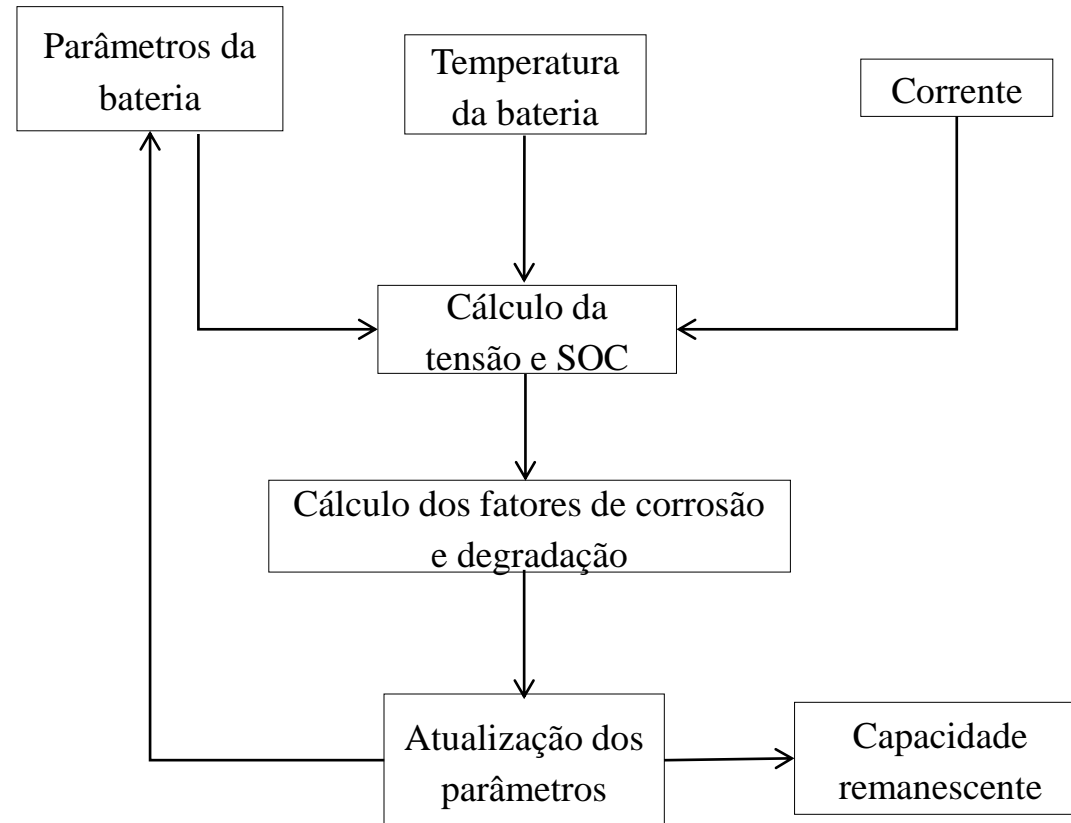
Modelo dos ciclos totais equivalentes

$$Z_N(t + \Delta t) = Z_N(t) + \frac{|I_{descarga}(t)|\Delta t}{C_N}$$

Z_N : Quantidade de ciclos completos
 $|I_{descarga}(t)|$: Valor absoluto da corrente de descarga

Estimação do tempo de vida útil

Modelo Schiffer



Estimação do tempo de vida útil

Fatores de degradação e estresse

	Corrosão da camada positiva	Sulfatação	Perda da massa ativa	Perda de água	Degradação da massa ativa	Estratificação do eletrólito
Maior taxa de descarga	BAIXO	ALTO	MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	MÉDIO
Tempo em baixo SOC	BAIXO	ALTO	BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO
Ah extraído	BAIXO	BAIXO	ALTO	BAIXO	MÉDIO	ALTO
Fator de carga	BAIXO	ALTO	ALTO	ALTO	BAIXO	ALTO
Tempo entre cargas completas	ALTO	ALTO	MÉDIO	MÉDIO	BAIXO	ALTO
Ciclagem parcial	MÉDIO	MÉDIO	BAIXO	BAIXO	MÉDIO	MÉDIO
Temperatura	ALTO	MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	MÉDIO	BAIXO

Modelagem do Sistema



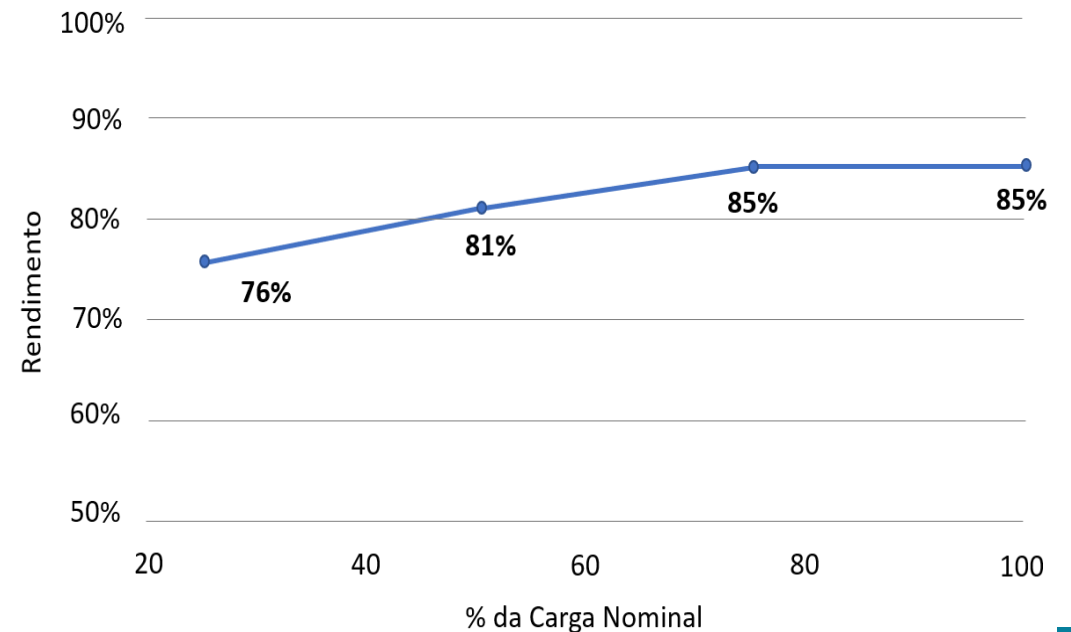
Modelagem do Sistema

Inversores

- O sistema possui dois inversores trifásicos (rendimento de 90% sob condições nominais, potência máxima de 30 kVA/30 kW, 60 Hz, saída trifásica através de um transformador de isolação $\Delta - Y$)
- Os inversores possuem operação individual ou em paralelo
- Inversores com compartilhamento de carga por controle DROOP

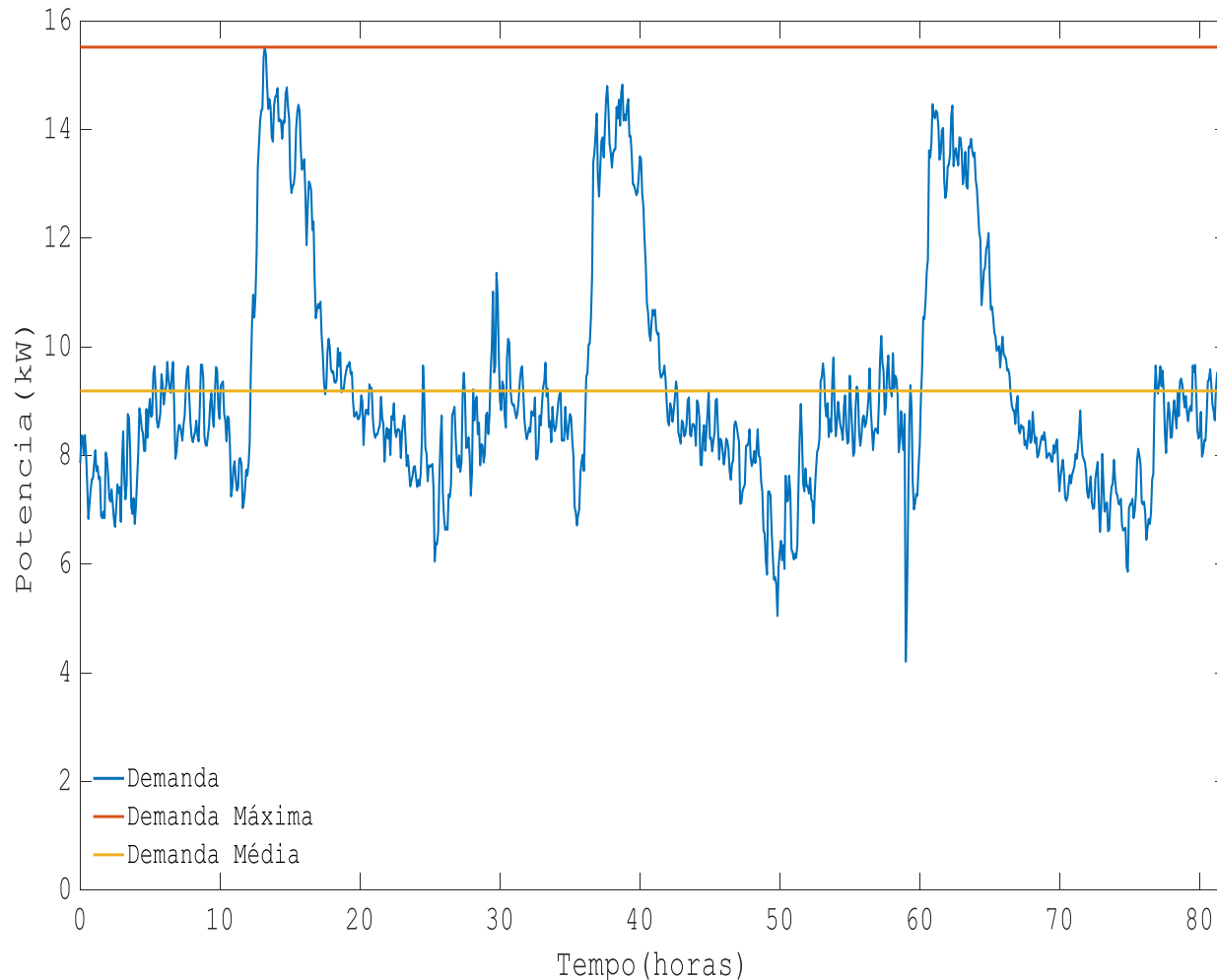
Retificador

O retificador e o gerador à diesel são ativados quando o banco de baterias atinge um SOC mínimo pré-determinado



Modelagem da curva de demanda

Demanda medida entre os dias 17 e 20 de agosto de 2018

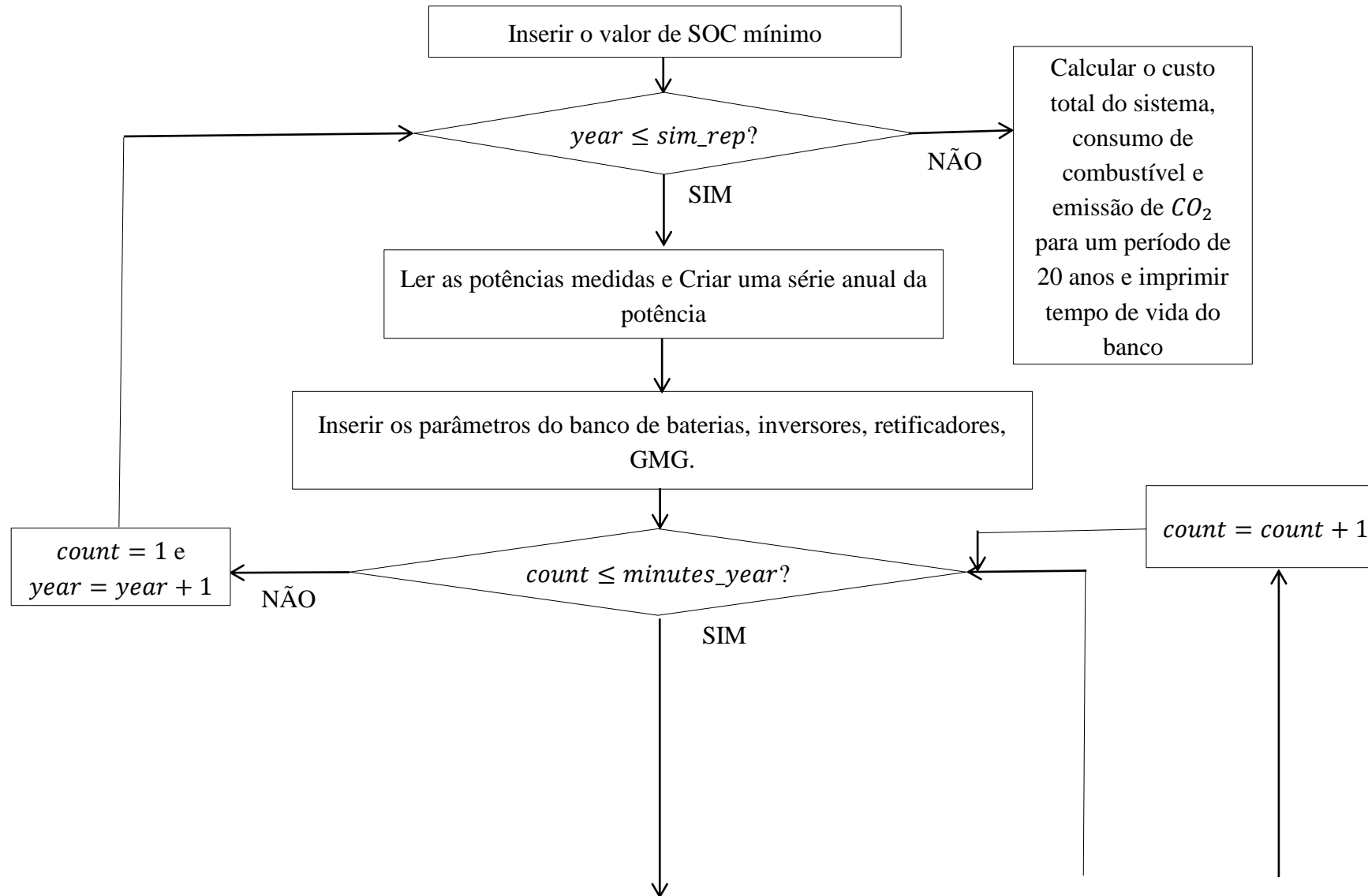


- Replica-se a série medida ao longo de um período de um ano, aplicando-se um ruído Gaussiano
- Aplica-se um fator de ajuste
- Calcular a potência (kW) fornecida ao longo de um ano com intervalo de minuto a minuto

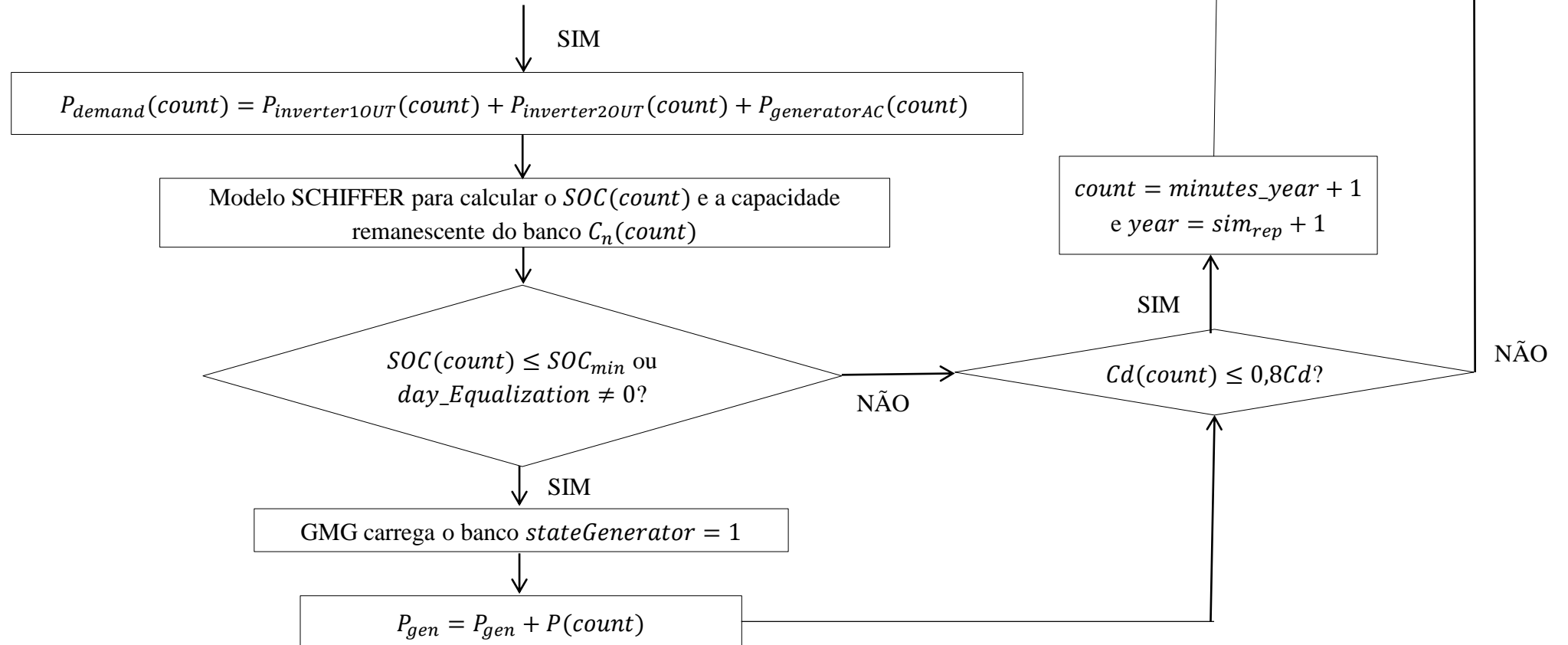
Modelagem da curva de demanda

Mês	Energia Medida (kWh)	Energia Simulada (kWh)	Fator de Ajuste $\left(\frac{\text{Energia Medida}}{\text{Energia Simulada}}\right)$
Janeiro	6.786	6.435,7	1,0544
Fevereiro	5.301	5.812,5	0,9120
Março	5.783	6.438,1	0,8982
Abril	6.432	6.229,8	1,0324
Maio	7.077	6.436,1	1,0995
Junho	6.660	6.231,4	1,0687
Julho	7.005	6.435,0	1,0885
Agosto	6.368	6.435,7	0,9894
Setembro	6.284	6.229,1	1,0088
Outubro	6.513	6.438,1	1,0116
Novembro	5.812	6.229,8	0,9329
Dezembro	6.513	6.437,0	1,0118

Formulação do problema e implementação do algoritmo



Formulação do problema e implementação do algoritmo



Simulação da operação do sistema isolado da Ilha de Lençóis

$$P_{rectifierOUT} = \eta_{rectifier} P_{rectifierIN}$$

$$P_{generator} = P_{rectifierIN} + P_{generatorAC}$$

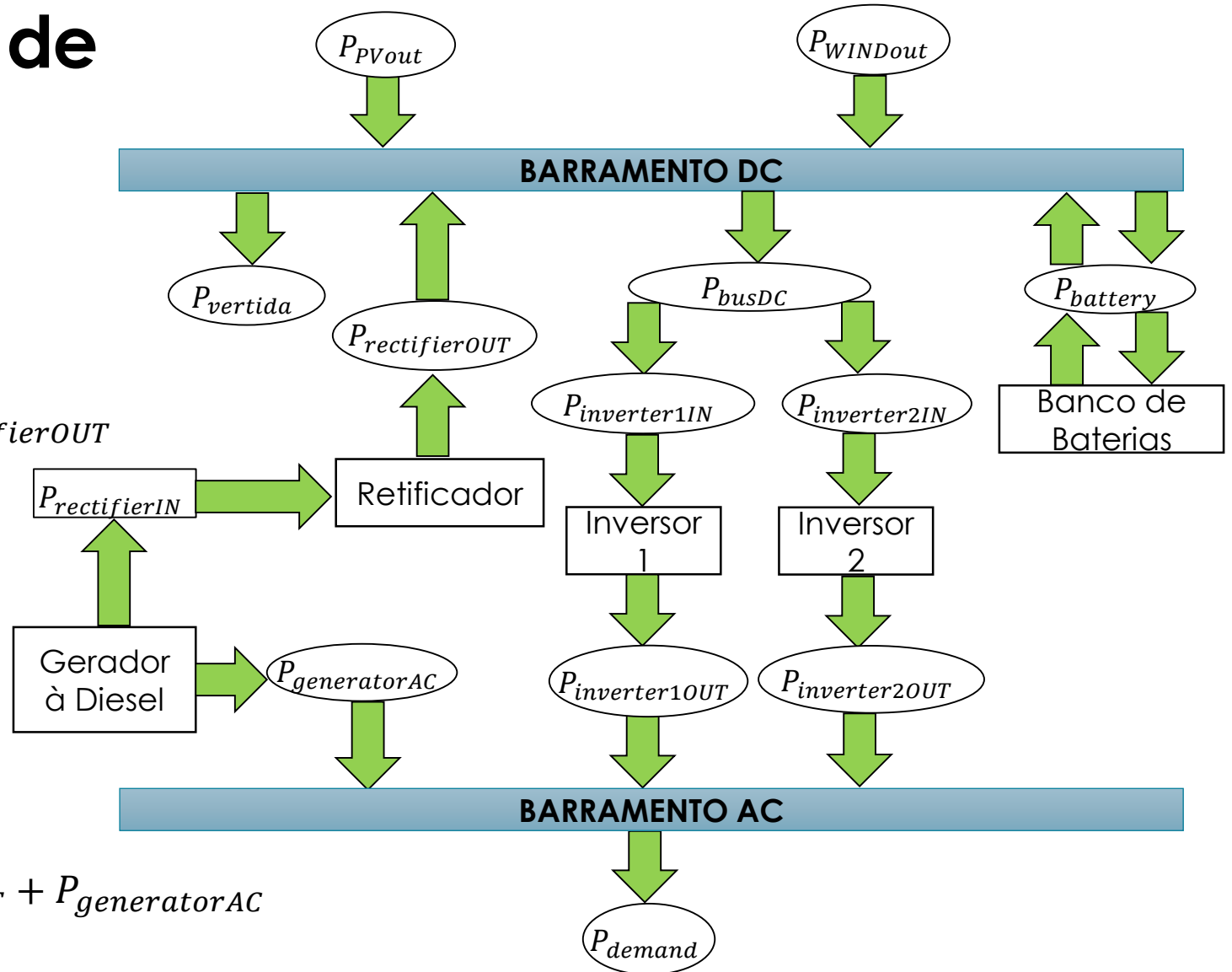
$$P_{busDC} = P_{PVout} + P_{WINDout} + P_{battery} + P_{rectifierOUT}$$

$$V_{batteryMIN} \leq V_{battery} \leq V_{batteryMAX}$$

$$P_{inverter1OUT} = \eta_{inverter1} P_{inverter1IN}$$

$$P_{inverter2OUT} = \eta_{inverter2} P_{inverter2IN}$$

$$P_{busAC} = P_{demand} = P_{inverter1OUT} + P_{inverter2OUT} + P_{generatorAC}$$



Simulação da operação do sistema isolado da Ilha de Lençóis

Definir o inversor prioritário

SE $P_{busDC} > P_{inverter1} + P_{inverter2}$ FAÇA

$$P_{vertida} = P_{busDC} - (P_{inverter1} + P_{inverter2})$$

$$P_{inverter1IN} = P_{inverter1}$$

$$P_{inverter2IN} = P_{inverter2}$$

SENÃO FAÇA

SE $P_{demand} < \frac{P_{inverter1IN}}{2}$ OU $P_{demand} < \frac{P_{inverter2IN}}{2}$ FAÇA

$$P_{NOpriority} = 0$$

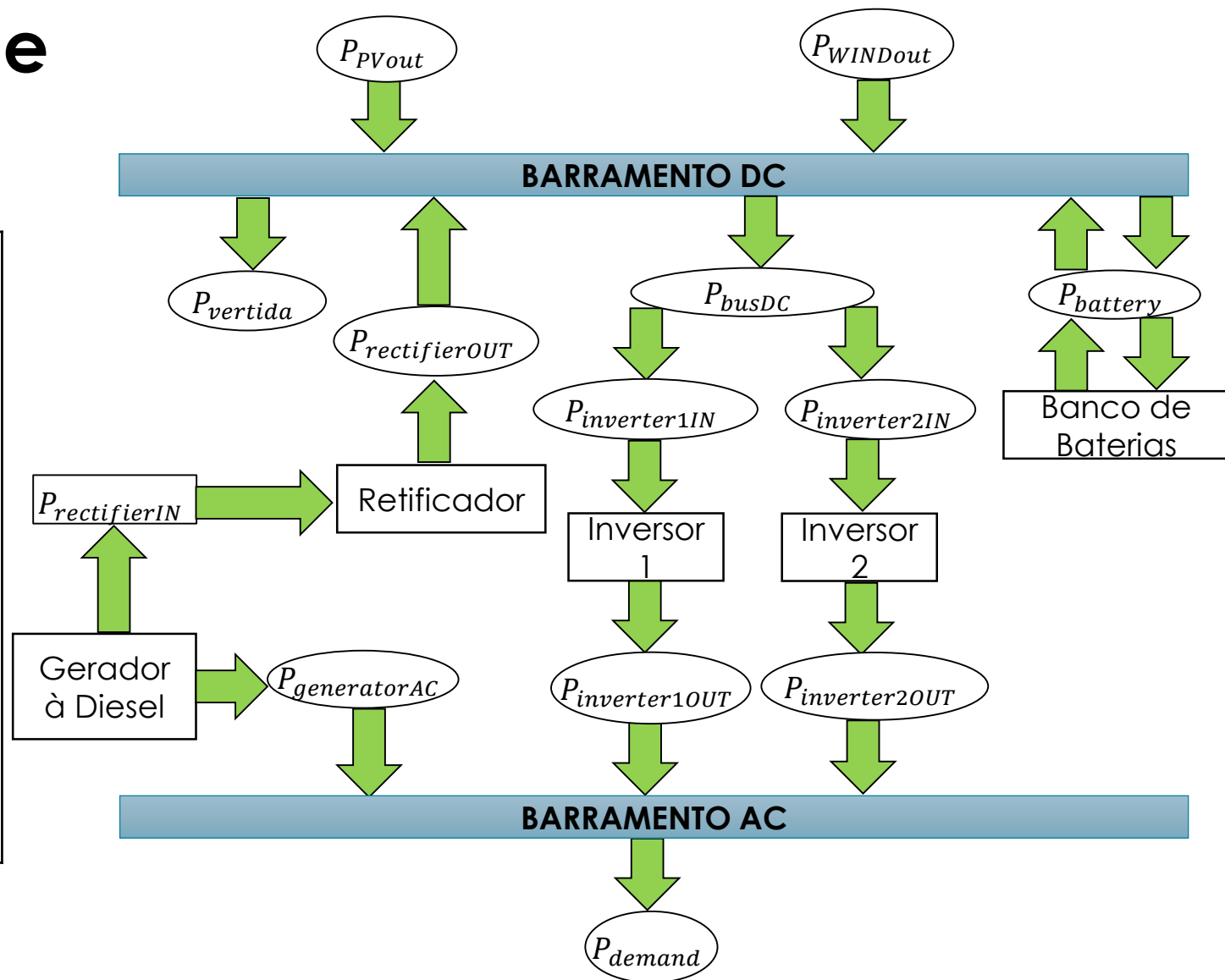
$$P_{priority} = P_{demand}$$

SENÃO FAÇA

Os inversores receberão P_{demand}

FIM SE

FIM SE



Cálculo do custo total

A determinação dos custos foi determinada da seguinte forma

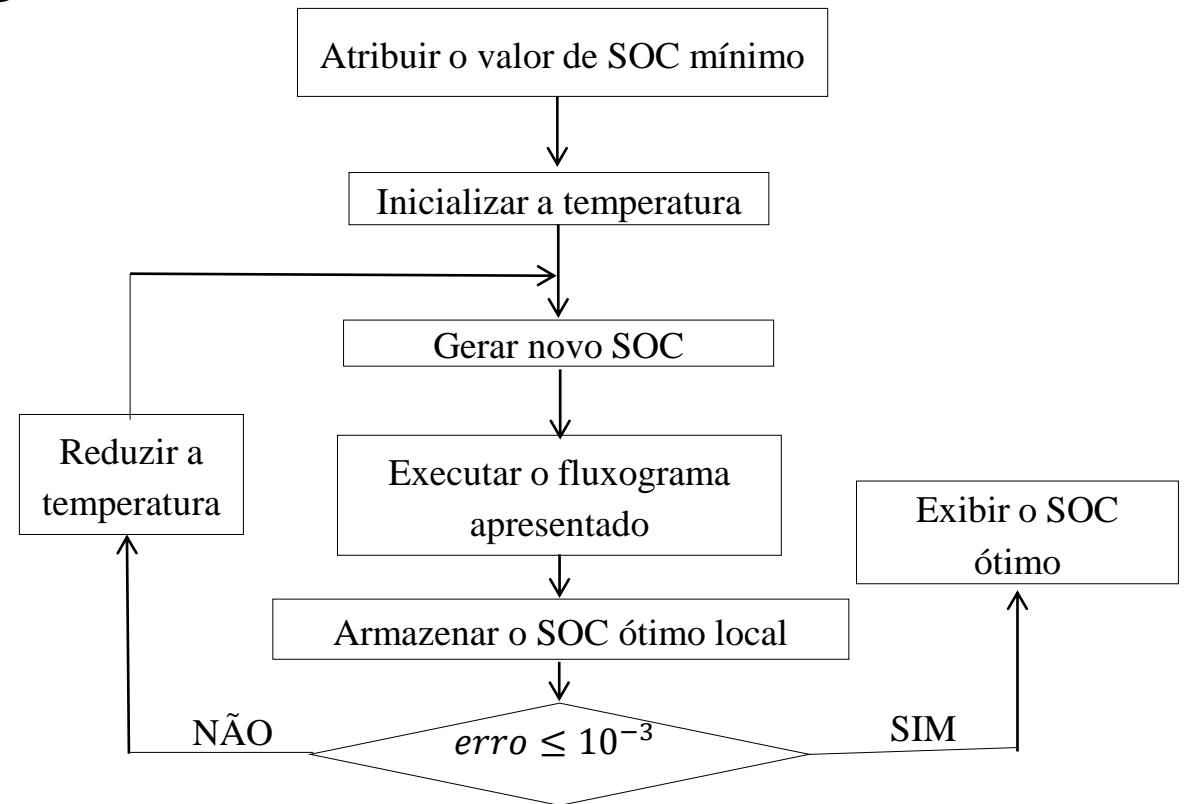
$$CT_{disp} = CI_{disp} + \sum_{n=1}^j \frac{OM_{disp}}{(1+i)^n}$$

Para o caso analisado no trabalho

$$CT_{avaliado} = CT_{bateria} + CT_{geradorDiesel}$$

Determinação do SOC mínimo ótimo para acionar o GMG utilizando *Simulated Annealing*

$$erro = |custo_{atual} - custo_{menor}|$$



Resultados



Resultados

Resumo energético simulado da microrrede da Ilha de Lençóis

	Energia Anual Gerada (kWh)	%
FV	43.595,7	46,65
Aerogeradores	31.247	33,44
Gerador à diesel	18.612,08	19,91
Total	93.454,78	100
	Energia Anual Consumida (kWh)	%
Demanda	76.534	81,90
Energia Vertida	6.775,7	7,25
Perdas	10.145,08	10,85
Total	93.454,78	100

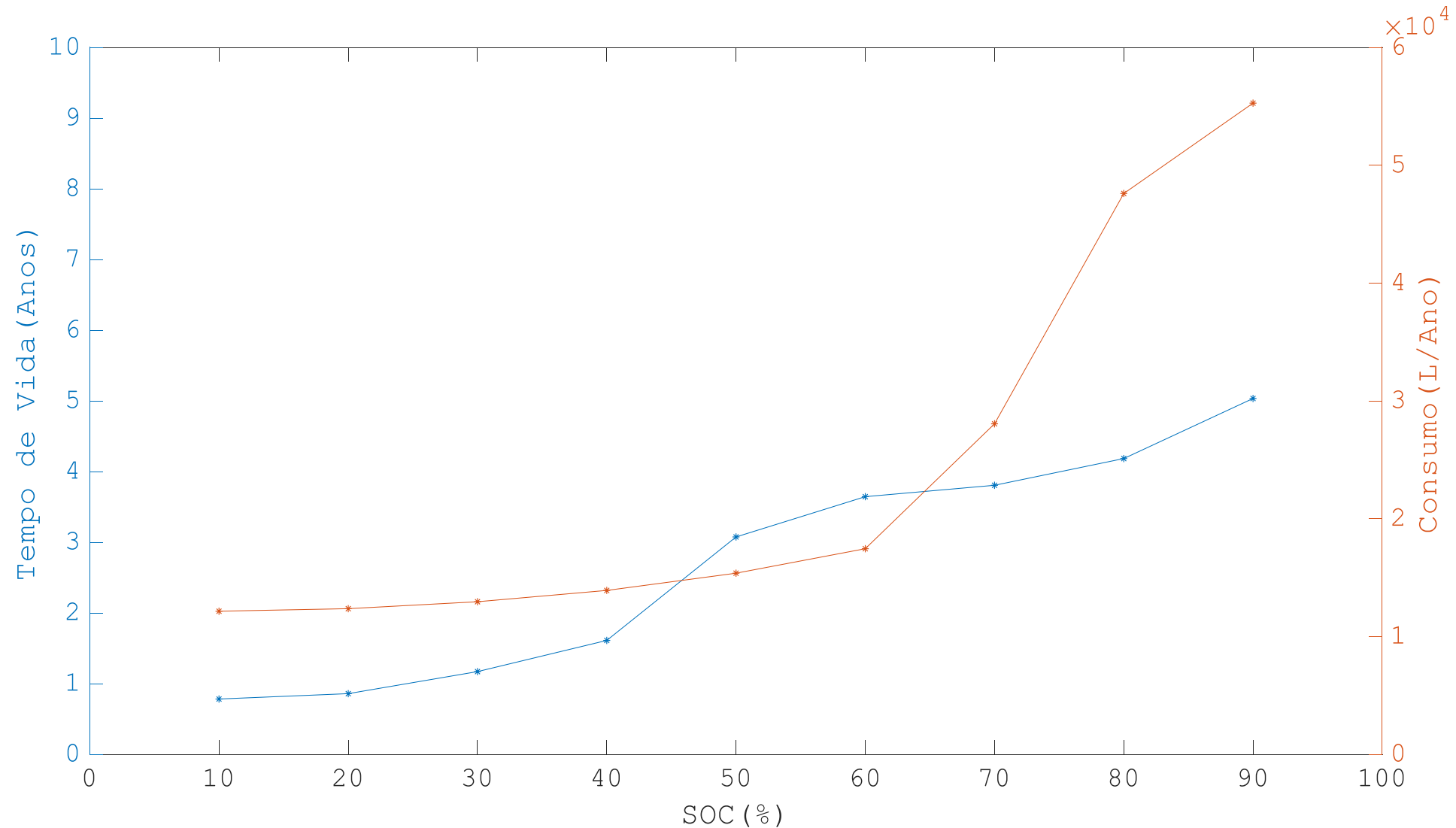
Resultados

Tempo de Vida e Consumo de diesel para diferentes SOC_{min}

SOC_{min} (%)	Tempo de vida útil do Banco de baterias (Anos)	Consumo anual de diesel (L/Ano)
10	0,783	12.151,856
20	0,859	12.367,407
30	1,171	12.956,397
40	1,612	13.916,565
50	3,076	15.378,491
60	3,646	17.458,296
70	3,807	28.059,480
80	4,185	47.612,691
90	5,035	55.281,219

Resultados

Tempo de Vida e Consumo de diesel para diferentes SOC_{min}



Resultados

- O tempo de vida útil da das baterias sofreu uma redução de 84,44%
- No caso do SOC mínimo de 10%, o consumo de diesel foi 78,01% menor comparado com o consumo para o SOC mínimo de 90%
- Vale lembrar que para valores SOC mínimo muito altos, a bateria ficará muito tempo carregada, podendo haver sobrecarga, aumento da temperatura interna

Resultados

A quantidade de acionamento tem a variação máxima de 87,27% entre o menor valor de SOC mínimo avaliado e o maior valor

SOC_{min} x Quantidade de acionamentos do gerador à diesel

SOC_{min} (%)	Quantidade anual de acionamentos do gerador à diesel
10	70
20	70
30	78
40	86
50	110
60	122
70	209
80	404
90	550

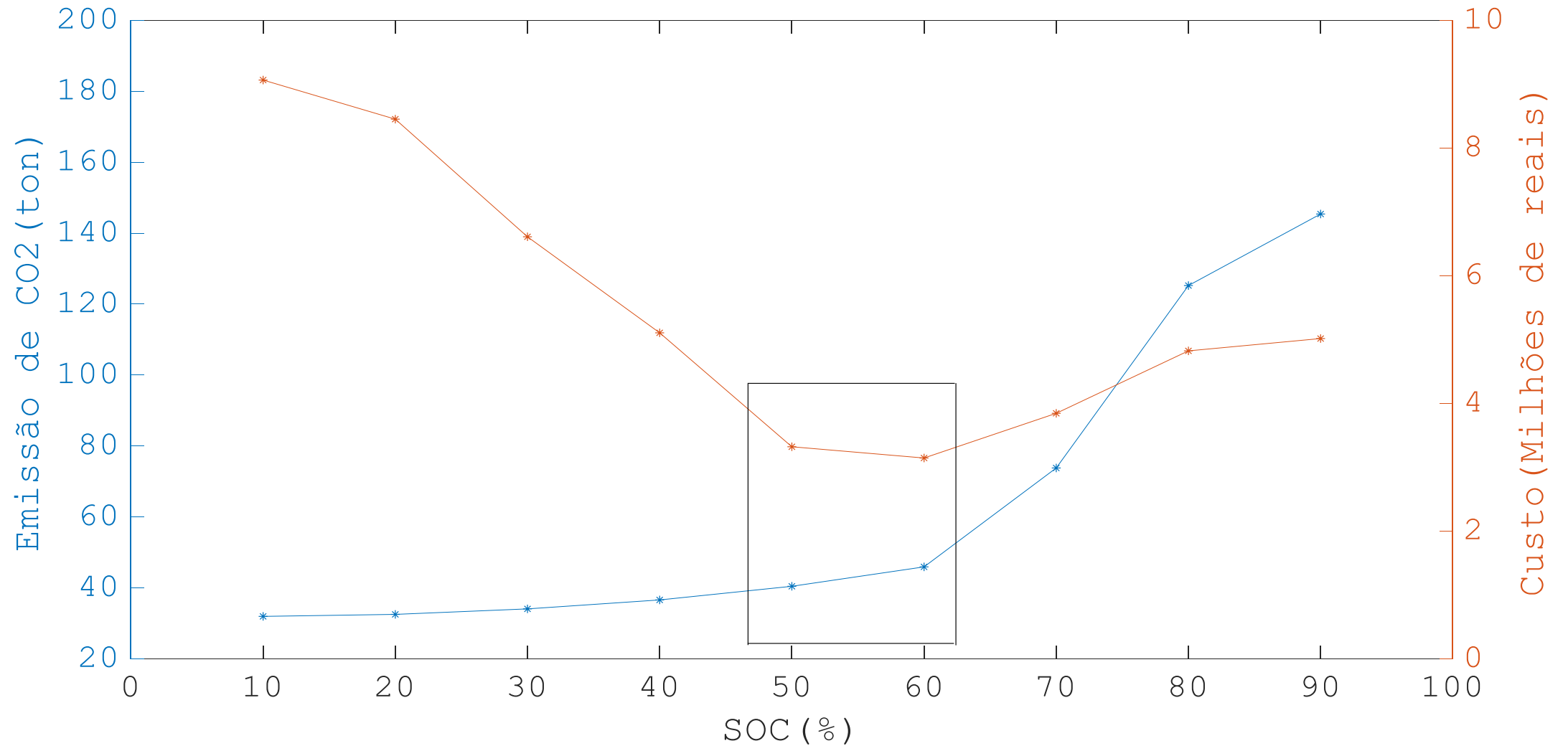
Resultados

Resultado financeiro e ambiental para diferentes SOC_{min}

SOC_{min} (%)	Emissão de CO_2 (Kg)	Custo (R\$)
10	31.959,381	R\$ 9.064.348,42
20	32.526,280	R\$ 8.451.596,33
30	34.075,324	R\$ 6.609.532,15
40	36.600,565	R\$ 5.105.473,00
50	40.445,431	R\$ 3.321.055,53
60	45.915,318	R\$ 3.144.907,85
70	73.796,432	R\$ 3.844.986,04
80	125.221,377	R\$ 4.822.742,53
90	145.389,605	R\$ 5.015.661,47

Resultados

Intervalo ótimo de SOC_{min}



Resultados

Comparativo entre SOC_{min} atual e o SOC_{min} calculado pelo SA

SOC_{min} (%)	Tempo de vida útil do Banco de baterias (Anos)	Consumo anual de diesel (L/Ano)	Quantidade anual de acionamentos do gerador à diesel	Emissão de CO_2 (Kg)	Custo (R\$)
50	3,076	15.378,491	110	40.445,431	3.321.055,53
53,395	3,395	16.082,076	116	42.295,859	3.271.804,58

- Aumento de 4,57% nas emissões de CO_2
- Aumento de 10,37% na vida útil do banco de baterias
- Reduziu-se 1,48% do custo do sistema

Conclusões



Conclusões

- Para baixos valores de SOC_{min} , o tempo de vida útil do banco de baterias é drasticamente reduzido
- Considerando altos valores de SOC_{min} , o GMG foi utilizado mais vezes, aumentando a quantidade de diesel consumido e a emissão de CO_2
- Conclui-se que com relação aos custos, os melhores valores de SOC_{min} , foram valores intermediários
- Um valor ótimo dentro desse intervalo já considerado ideal, com SOC_{min} de 53,395%, obteve-se uma redução de 1,48% no custo do sistema, aumento de 10,37% no tempo de vida útil do banco e 4,57% nas emissões de CO_2
- O Sistema é atualmente operado com valor de SOC_{min} muito próximo ao valor encontrado pelo SA

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Incluir a temperatura minuto a minuto das baterias e avaliar o impacto no tempo de vida útil do banco
- Analisar qual será o novo SOC_{min} ótimo para iniciar o carregamento do sistema de armazenamento em uma eventual expansão do sistema, no caso, aumento do banco de baterias chumbo-ácido ou geração eólica ou solar
- Estudo das novas estratégias de utilização do GMG caso seja considerado a inclusão da geração maremotriz
- O efeito da inclusão de outras tecnologias de armazenamento, tais como baterias de fluxo, de lítio, entre outras. Analisando a viabilidade econômica, seus impactos ao meio ambiente e no uso do GMG

Artigos Associados a Dissertação

- Performance Analysis and Impact of Improvements added in Ten-Years of Operation of Microgrid of Lençóis Island. IECON 2019 – Lisboa, Portugal. DOI: 10.1109/IECON.2019.89227041.



OBRIGADO