

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta _____
será disponibilizado somente a partir
de 22/02/2023.

OMAR ROSENDO LLERENA PIZARRO

Modelagem e Dimensionamento de Sistemas Híbridos de
Geração de Energia: Caso para as Ilhas Galápagos

Guaratinguetá

2021

Omar Rosendo Llerena Pizarro

**Modelagem e Dimensionamento de Sistemas Híbridos de
Geração de Energia: Caso para as Ilhas Galápagos**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na área de
Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Co-orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá

2021

P695m	Pizarro, Omar Rosendo Llerena Modelagem e dimensionamento de sistemas híbridos de geração de energia: caso para as ilhas Galápagos / Omar Rosendo Llerena Pizarro – Guaratinguetá, 2021. 144 f. : il. Bibliografia: f. 95-109 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira Coorientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna 1. Energia – Fontes alternativas. 2. Geração distribuída de energia elétrica. 3. Otimização matemática. 4. Modelos matemáticos. I. Título. CDU 620.91(043)
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

OMAR ROSENDO LLERENA PIZARRO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

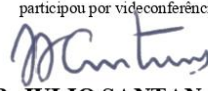
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


PROF. DR. JOSE LUZ SILVEIRA
Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência


PROF. DR. JULIO SANTANA ANTUNES
UNESP/FEG
participou por videoconferência


PROF. DR. TEOFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP/FEG
participou por videoconferência


PROF. DR. NESTOR PROENZA PÉREZ
CEFET
participou por videoconferência


PROF. DR. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU
participou por videoconferência

Fevereiro de 2021

Publicações Científicas:

✓ Publicações em periódicos internacionais:

Electricity sector in the Galapagos Islands: Current status, renewable sources, and hybrid power generation system proposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 108, n. February, p. 65–75, 2019.

A PSO-BPSO Technique for Hybrid Power Generation System Sizing. *Latin America Transactions*, v. 18, June, p. 1362–1370, 2020.

✓ Publicações em congressos internacionais:

A Technical Study of a Hybrid Solar-Wind-Biogas Power System. *The 13th Latin-American congress on electricity generation and transmission - CLAGTEE 2019*, October, 2019.

✓ Publicações em eventos nacionais:

Dimensionamento de um Sistema Híbrido gerador de Energia para as Ilhas Galápagos. *III Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção*, FEG-UNESP, outubro, 2019.

Assessing the Current Status of the Electricity Sector of the Galapagos Islands. *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2020*, novembro, 2020.

DADOS CURRICULARES

OMAR ROSENDO LLERENA PIZARRO

NASCIMIENTO	12.09.1987 – PELILEO/EQUADOR
FILIAÇÃO	Narlon Geofre Llerena Ramos Lourdes Dolores Pizarro Ramón
2005/2009	Curso Técnico, Tecnólogo em Eletrônica, <i>Universidad Politécnica Salesiana</i> , Cuenca, Equador.
2009/2012	Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica na <i>Universidad Politécnica Salesiana</i> , Cuenca, Equador.
2015/2017	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Brasil.
2017/2021	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Brasil.

de modo especial, aos meus pais
Narlon e Lourdes pelo apoio dado ao longo dos
meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e sabedoria, e também, por ter colocado as pessoas certas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho;

ao meu orientador, Prof. Dr. José Luz Silveira, pela confiança, amizade e orientação para que este trabalho fosse concluído;

ao meu co-orientador, Prof. Dr. Celso Tuna, pelo auxílio no desenvolvimento desta tese de doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

"Quem nunca errou nunca experimentou nada novo"

Albert Einstein

RESUMO

O setor elétrico das Ilhas Galápagos é dependente dos combustíveis fósseis para a geração de eletricidade, utilizando apenas 15% das fontes renováveis existentes no arquipélago. Portanto, neste cenário, torna-se importante a realização de estudos que visem a implementação de Sistemas Híbridos de Geração de Energia (SHGE) que incrementem a participação de tais recursos renováveis, de modo a diversificar a sua matriz energética, diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, e promover o desenvolvimento sustentável nas Ilhas. O dimensionamento adequado destes SHGE traz benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta para a modelagem matemática, simulação, e dimensionamento de SHGE. Para tal finalidade, desenvolveu-se um algoritmo de otimização multi-objetivo no MATLAB®. As variáveis de decisão contínuas (número de componentes) e as variáveis de decisão discretas (modelos/tipos dos componentes) envolvidas no projeto do SHGE são tratadas independentemente pelo *Particle Swarm Optimizer* (PSO) e pelo *Binary Particle Swarm Optimizer* (BPSO), respectivamente. O objetivo da otimização é minimizar o valor presente líquido dos custos, e maximizar a confiabilidade operacional do sistema. O algoritmo misto proposto (PSO-BPSO) é utilizado para dimensionar sistemas solar-bateria-diesel e solar-bateria-biogás para as Ilhas Galápagos. Os resultados mostram que a técnica proposta apresentou igual, e em alguns casos, melhor desempenho que os outros métodos comparados. Nos resultados, observa-se que os SHGE que combinam painéis fotovoltaicos (PV), baterias (BT) e geradores à diesel (DG) são as configurações ótimas com um custo de US\$ 116.681,20 para a Ilha Floreana e um custo de US\$ 856.878,46 para a Ilha San Cristóbal. Por outro lado, as configurações PV-BT implicam custos mais elevados devido à necessidade do uso de bancos de baterias maiores. No caso dos sistemas solar-baterias-biogás, estes resultaram ser aproximadamente 30% mais baratos. Finalmente, conclui-se que o PSO-BPSO proposto neste trabalho mostrou ser uma ferramenta simples e eficaz para o dimensionamento de SHGE tanto para abordagens mono-objetivo, quanto para abordagens multi-objetivo.

PALAVRAS-CHAVE: SHGE. PSO-BPSO. otimização multi-objetivo. energia renovável. Galápagos.

ABSTRACT

The electrical sector in the Galapagos Islands is dependent on fossil fuels for electricity generation, using only 15% of the renewable sources in the archipelago. Therefore, in this scenario it is important to carry out studies aimed at the implementation of Hybrid Power Generation Systems (HPS) which increase the participation of such renewable resources in order to diversify islands' energy matrix and reduce the dependence on fossil fuels thus promoting sustainable development. The adequate sizing of the HPS brings technical, economic, and environmental benefits. In this context, this work presents the development of a tool for mathematical modeling, simulation, and sizing of the HPS. For this purpose, a multi-objective optimization algorithm was developed in MATLAB®. The continuous decision variables (number of components) and discrete decision variables (models/types of components) involved in the HPS project are handled independently by the Particle Swarm Optimizer (PSO) and the Binary Particle Swarm Optimizer (BPSO), respectively. The purpose of optimization is to minimize the net present value of costs, and to maximize the operational reliability of the system. The proposed mixed algorithm (PSO-BPSO) is used to design solar-battery-diesel and solar-battery-biogas systems for the Galapagos Islands. The results show that the proposed technique presented the same, and in some cases, better performance than the other compared methods. The results reveal that the HPS configuration which combines photovoltaic panels (PV), batteries (BT) and diesel generators (DG) is the optimal configuration with a cost of US \$ 116,681.20 for Floreana Island and a cost of US \$ 856,878.46 for San Cristóbal Island. On the other hand, PV-BT configurations incur higher costs due to the need OF larger battery banks. Solar-batteries-biogas systems turned out to be approximately 30% cheaper. Finally, the PSO-BPSO proposed in this work proved to be a simple and effective tool for the sizing of HPS for both mono-objective and multi-objective approaches

KEYWORDS: HPS sizing. PSO-BPSO. Multi-objective optimization. Renewable energy. Galapagos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proposta do Sistema Híbrido de Geração de Energia Renovável para as Ilhas Galápagos.	27
Figura 2. Localização das Ilhas Galápagos.	35
Figura 3. Matriz de geração de energia elétrica de Galápagos em 2016.....	39
Figura 4. Demanda elétrica e número de usuários no período (2013 – 2025).	43
Figura 5. Preços médios aplicados aos clientes da E. E. Galápagos.....	44
Figura 6. Histórico e previsão da cobertura de energia elétrica.	47
Figura 7. Perdas elétricas anuais (histórico e previsão) no sistema de distribuição.	47
Figura 8. Configuração do sistema de energia híbrido solar-bateria-diesel.....	50
Figura 9. Configuração do sistema de energia híbrido solar-bateria-biogás.....	51
Figura 10. Proposta do algoritmo de otimização baseado em simulação.	52
Figura 11. Passos 1 e 2 do algoritmo de otimização baseado em simulação.	53
Figura 12. Algoritmo de otimização e simulação.	54
Figura 13. Potencial total de biogás nas Ilhas Galápagos.	62
Figura 14. Estratégia de operação do SHGE com <i>back up</i> a diesel.	64
Figura 15. Estratégia de operação do SHGE com <i>back up</i> a biogás.	64
Figura 16. Problema de otimização.....	68
Figura 17. Formação do vetor final para o PSO-BPSO.	70
Figura 18. Funcionamento do método sem preferência de função objetivo.	75
Figura 19. Perfil diário de irradiação solar (a) de junho a novembro e (b) de maio a dezembro. c) Perfil horário da irradiação solar durante um ano.	77
Figura 20. Perfil de carga CA: (a) San Cristóbal em um ano, (b) San Cristóbal em um dia, (c) Floreana em um dia e (d) Floreana em um ano.....	78
Figura 21. Evolução do algoritmo: (a) para a Ilha Floreana, (b) para a Ilha San Cristóbal.	85
Figura 22. Simulação da configuração solar-bateria para a Ilha Floreana.	86
Figura 23. Simulação da configuração solar-bateria-diesel para a Ilha Floreana.	87
Figura 24. Fronteira de Pareto ótima para uma configuração solar-bateria-diesel: (a) Floreana e (b) San Cristóbal.	88
Figura 25. Modelo de circuito equivalente de um diodo.	123
Figura 26. Curvas características I-V e P-V.....	124
Figura 27. Associação de painéis fotovoltaicos em série.....	126

Figura 28. Associação de painéis fotovoltaicos em paralelo.	127
Figura 29. Potencial total de biogás nas Ilhas Galápagos.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Revisão de literatura das abordagens do algoritmo PSO para o dimensionamento de SHGE.....	29
Tabela 2. Características gerais das ilhas povoadas.....	36
Tabela 3. Potência nominal Instalada do Setor Elétrico de Galápagos.....	38
Tabela 4. Usuários/ Energia Disponível/ Energia Faturada no ano 2016.	42
Tabela 5. Preço de compra segundo o tipo de energia.....	45
Tabela 6. Fatores de emissão utilizados na análise de emissões do ciclo de vida.	72
Tabela 7. Variáveis de decisão contínuas e discretas do problema de otimização.	79
Tabela 8. Características técnicas dos componentes.....	79
Tabela 9. Valores utilizados para calcular o NPVc.....	81
Tabela 10. Resultados da abordagem mono-objetivo.	83
Tabela 11. Resultados da abordagem multiobjetivo.	89
Tabela 12. Resultados do sistema solar-bateria-biogás.....	91
Tabela 13. Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos utilizados.	118
Tabela 14. Investimento inicial dos módulos PV.....	118
Tabela 15. Especificações técnicas das baterias utilizadas.	119
Tabela 16. Investimento inicial das baterias.	119
Tabela 17. Especificações técnicas dos grupos motores geradores à biogás.	120
Tabela 18. Investimento inicial dos grupos motores geradores a biogás.....	120
Tabela 19. Especificações técnicas dos inversores.	121
Tabela 20. Investimento inicial dos inversores.....	121
Tabela 21. Resumo dos custos utilizados na análise econômica.	122
Tabela 22. Potencial de biogás nas Ilhas Galápagos por digestão anaeróbica do esterco animal.	134
Tabela 23. Matéria Orgânica Produzida em Galápagos.....	135
Tabela 24. Potencial de biogás nas Ilhas Galápagos a partir dos RSM.	136
Tabela 25. Composição química do biogás.....	137
Tabela 26. Diferença de entalpia, entalpia de formação e massa molar dos elementos da combustão.....	138
Tabela 27. Poder calorífico inferior do biogás.....	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Fator de idealidade modificado	-
AB	Biodigestor anaeróbico	-
AG	Algoritmo genético	-
ARCBQG	Agência de Regulação e Controle de Biossegurança e Quarentena de Galápagos	-
ARCONEL	Agência de Regulamentação e Controle de Eletricidade	-
BG	Gerador a Biogás	-
BPSO	<i>Binary Particle Swarm Optimizer</i>	-
BS	Armazenamento de biogás	-
BT	Banco de Baterias	-
BUG	<i>Back up generator</i>	-
CA	Corrente Alternada	-
CC	Corrente Contínua	-
CC/CA	Corrente Contínua – Corrente Alternada	-
C/I	Conversor bidirecional ou inversor	-
CO ₂	Dióxido de carbono	-
CONV	Conversor Bidirecional	-
DA	Digestão Anaeróbica	-
DG	Gerador Diesel	-
DG/BG	Gerador Diesel – Gerador Biogás	-
Diesel-ORC	<i>Diesel - Organic Rankine Cycle</i>	-
DMOPSO	<i>Dynamic multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm</i>	-
DOD	<i>Depth of discharge</i>	[%]
DST	Armazenamento Diesel	-
EBC	Espaço de busca contínua	-
EF	Estratégia de funcionamento do SHGE	-
E.E.GALAPAGOS S.A.	Companhia Provincial de Eletricidade de Galápagos	-
E-PSO	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>	-

FMIk	Frequência de Interrupção Média	-
FT	Função de transferência	-
G	Melhor posição	-
GBEST	Melhor global	-
GB	Gerador biogás	-
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i>	-
GA-PSO	<i>Genetic Algorithm - Particle Swarm Optimizer</i>	-
GSEP	<i>Global Sustainable Electricity Partnership</i>	-
GSA	<i>Global Solar Atlas</i>	-
HOMER	<i>Hybrid Optimization Model for Energy Resources</i>	-
I	Iteração	-
INEC	Instituto de Estatística e Censos do Equador	-
INECEL	Instituto de Eletrificação do Equador	-
I.V.A	Imposto sobre valor agregado	[%]
INV1	Inversor de 3kW até 30kW	-
INV2	Inversor de 30kW até 72kW	-
LBM	<i>Lifetime Battery Model</i>	[-]
L _{CA}	Carga CA	-
LED	<i>Light-emitting diode</i>	-
LF	Load Following	-
LOSPEE	Lei Orgânica do Serviço Público de Energia Elétrica	-
MCI	Motor de Combustão Interna	-
MEER	Ministério da Eletricidade e Energia Renovável	-
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>	-
MOPSO	<i>Multi- Objective Particle Swarm Optimization</i>	-
MPSO	<i>Modified Particle Swarm Optimization</i>	-
n	Número de módulos fotovoltaicos em série/paralelo	-
N _{BT}	Número de baterias	-
nd	Fator de idealidade do diodo	-
N _{INV1}	Número de inversores de 3kW até 30kW	-
N _{INV2}	Número de inversores de 30kW até 72kW	-
N _{GB}	Número de geradores biogás	-
noI	Número de iterações	-

noP	Número de partículas	-
N _{PV}	Número de módulos fotovoltaicos	-
N _s	Número de células em série	-
P	Potência	[W]
PBEST	Melhor pessoal	-
PCE	Projeto Cozinha Eficiente	-
PG	Plano de Galápagos	-
PLANEE	Plano Nacional de Eficiência Energética	-
PLANREP	Plano de Redução de perdas de Energia Elétrica	-
PME	Plano Mestre de Eletrificação	-
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento	-
PPV	Potência nominal do painel fotovoltaico	[Wp]
PSO	<i>Particle Swarm Optimizer</i>	-
PSO-BPSO	Otimizador por enxame de partículas contínuo e binário	-
PSO-GWO	<i>Particle Swarm Optimization - Grey Wolf Optimizer</i>	-
PSO e QP	<i>Particle Swarm Optimizer - Quadratic programming</i>	-
RSM	Resíduos Sólidos Municipais	-
PV	Painel fotovoltaico	-
S	Forma da função de transferência	-
SEG	Setor Elétrico de Galápagos	-
SHGE	Sistema Híbrido Gerador de Energia	-
SNI	Sistema Nacional Interligado	-
SOC	State of charge	[%]
Swarm	Vetor de decisão	-
TEP	<i>Tonelada Equivalente de Petróleo</i>	-
TTIk	Tempo Total de Interrupção	-
UGPV	Unidade Geradora de Energia Fotovoltaica	-
VDC	Variável de decisão contínua	-
VDD	Variável de decisão discreta	-
WT	<i>Wind Turbine</i>	-
ZCFIG	Zero Combustíveis Fósseis nas Ilhas Galápagos	-

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
c	Taxa de capacidade	-
CBT	Capacidade energética nominal da bateria	[Wh]
$C_{i,BT}$	Custo da bateria	[US\$]
$C_{i,GB}$	Custo do moto-gerador biogás	[US\$]
$C_{i,INV1}$	Custo do inversor de 3kW até 30kW	[US\$]
$C_{i,INV2}$	Custo do inversor de 30kW até 72kW	[US\$]
$C_{i,PV}$	Custo do painel fotovoltaico	[US\$]
C_{i,TOT_INV1}	Investimento inicial nos inversores de 3kW até 30kW	[US\$]
C_{i,TOT_INV2}	Investimento inicial nos inversores de 30kW até 72kW	[US\$]
$C_{i,UGB}$	Investimento inicial na unidade geradora biogás	[US\$]
$C_{i,UGBT}$	Investimento inicial na unidade geradora com baterias	[US\$]
$C_{i,UGPV}$	Investimento inicial da unidade geradora fotovoltaica	[US\$]
$Co\&m,BT$	Custo de operação e manutenção na unidade geradora com baterias	[US\$/ano]
$Co\&m,INV1$	Custo de operação e manutenção nos inversores de 3kW até 30kW	[US\$/ano]
$Co\&m,INV2$	Custo de operação e manutenção nos inversores de 30kW até 72kW	[US\$/ano]
$Co\&m,PV$	Custo de operação e manutenção na unidade geradora fotovoltaica	[US\$/ano]
$Co\&m,UGB$	Custo de operação e manutenção na unidade geradora biogás	[US\$/h]
$C_{sub,INV1}$	Custo de substituição nos inversores de 3kW até 30kW	[US\$]
$C_{sub,INV2}$	Custo de substituição nos inversores de 30kW até 72kW	[US\$]
$C_{sub,UGB}$	Custo de substituição da unidade geradora biogás	[US\$]
$C_{sub,UGBT}$	Custo de substituição da unidade geradora com baterias	[US\$]
$C_{sub,UGPV}$	Custo de substituição da unidade geradora fotovoltaica	[US\$]
c1	Constante positiva	-
c2	Constante positiva	-
E	Quantidade total de energia do BT	[kWh]

E_1	Energia disponível no início do processo de carga/descarga da bateria	[kWh]
E_2	Energia quimicamente ligada no início do processo de carga/descarga da bateria	[kWh]
$E_{1,i+1}$	Energia disponível no final do processo de carga e descarga da bateria	[kWh]
$E_{2,i+1}$	Energia quimicamente ligada no final do processo de carga/descarga	[kWh]
$EMCO_2$	Quantidade máxima de CO_{2-eq} emitido na operação do SHGE	[kg/ano]
F_c	Consumo de combustível diesel	[L/h]
f_{PV}	Fator de redução de potência (perdas não dependentes da temperatura)	[%]
F_0	Coeficiente de interceptação da curva de combustível	[L/h/kW _{-rated}]
F_1	Slop da curva de combustível	[L/hr/kW]
$f_1(\vec{x})$	Função objetivo 1	-
$f_2(\vec{x})$	Função objetivo 2	-
$g_j(\vec{x})$	Restrição igual ou maior que	-
$\vec{G}^t$	Melhor posição global no enxame na iteração t	-
$h_k(\vec{x})$	Restrição de igualdade	-
I	Corrente	[A]
I_L	Corrente foto-gerada	[A]
I_0	Corrente de saturação reversa do diodo	[A]
I_T	Irradiação solar incidente no painel fotovoltaico	[kW/m ²]
I_{Total}	Corrente total do arranjo	[A]
$I_{T,STC}$	Irradiação solar incidente em condições de teste padrão	[kW/m ²]
k	Constante de Condutância	[1/h]
$\dot{m}_{biogás}$	Fluxo mássico de biogás no motor de combustão interna	[kg/s]
N_{max_BT}	Número máximo de baterias	-
N_{max_CONV}	Número máximo de conversores	-
N_{max_PV}	Número máximo dos painéis solares fotovoltaicos	-
$N_{max_DG/BG}$	Número máximo de geradores a diesel ou geradores a biogás	-

NPV _c	Valor Presente Líquido dos Custos (<i>Net Present Value of costs</i>)	[US\$]
LPSP	Probabilidade de Perda no Fornecimento de Energia (<i>Loss of Power Supply Probability</i>)	[%]
P	Potência entregue, ou, fornecida pelas baterias	[kW]
$PCI_{biogás}$	Poder calorífico inferior do biogás	[kJ/kg]
P _{DG}	Saída do gerador diesel	[kW]
P _{DGN}	Potência nominal do gerador diesel	[kW]
P _{ex}	Excesso de potência	[kW]
P _{GB}	Potência do moto-gerador biogás	[W]
P _{INV}	Potência do inversor	[kW]
P _{PV}	Potência Fotovoltaica	[kW]
P _{out}	Potência de saída CC	[kW]
P _{inv, rated}	Potência nominal de CC	[kW]
$\vec{p}_i^t$	Melhor posição individual das partículas	-
Q	Carga eletrônica	[C]
r	Número aleatório entre 0 e 1	-
R _s	Resistência em série	[Ω]
R _{sh}	Resistência em paralelo	[Ω]
r1	Número aleatório entre 0 e 1	-
r2	Número aleatório entre 0 e 1	-
t	Tempo	h
T _a	Temperatura ambiente	[°C]
T _c	Temperatura da célula fotovoltaica	[°C]
T _{c,STC}	Temperatura da célula fotovoltaica em condições de teste padrão	[°C]
Total _{energy}	Energia Total	[kWh]
$T(\vec{V}_i^{t+1})$	Função de transferência sigmoide	-
t_{max}	Número total de iterações	-
V	Tensão	[V]
V _i	Tensão do painel i	[V]
V _i	Trajetória da partícula	-

V_{Max}	Velocidade máxima	-
V_{Min}	Velocidade mínima	-
$\overrightarrow{V}_t^t$	Velocidade na iteração t	-
$\vec{V}_i^{t+1}$	Velocidade das partículas na iteração (t + 1).	-
V_{Total}	Tensão total do arranjo	[V]
w	Número variável entre 0,2 e 0,9	-
W_{Max}	Inércia máxima	-
W_{Min}	Inércia mínima	-
W_{out}	Potência elétrica produzida no moto-gerador	[kW]
X_i	Posição atual	-
$\vec{X}_i$	Vetor de decisão	-
x_L	Limites inferior do vetor de decisão	-
x_U	Limites superior do vetor de decisão	-
x_1	Quantidade de painéis fotovoltaicos no vetor de decisão	-
x_2	Quantidade de baterias no vetor de decisão	-
x_3	Quantidade de conversores ou inversores no vetor de decisão	-
x_4	Quantidade de unidades geradoras no <i>back up</i>	-
x_5	Modelo dos painéis fotovoltaicos	-
x_6	Modelo das baterias	-
x_7	Modelo dos conversores ou inversores	-
x_8	Modelo das unidades geradoras no <i>back up</i>	-
x_{51} a x_{82}	Variáveis de decisão discretas.	-
$\overrightarrow{X}_t^{t+1}$	Posição da partícula (X_i) na iteração (t+1)	-
Y_{PV}	Potência de saída sob condições de teste padrão	[kW]

LISTA DE LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Unidade
α_p	Coeficiente de potência/temperatura	[%/°C]
η_{Elec_MCI}	Eficiência de geração de eletricidade do MCI	[%]
$\Omega_c - d$	Porcentagem de perdas de carregamento/descarregamento	[%]
Ω_{pv}	Perdas por fiação e dispersão	[%]

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
1.1	INFORMAÇÕES GERAIS	23
1.2	DIMENSIONAMENTO DE SHGE E ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO	28
1.3	MOTIVAÇÕES	31
1.4	OBJETIVOS DE PESQUISA.....	32
1.5	APRESENTAÇÃO INICIAL	33
2	CAPÍTULO 2: SETOR ELÉTRICO DE GALÁPAGOS.....	35
2.1	PERFIL DAS ILHAS GALÁPAGOS	35
2.2	O SETOR ELÉTRICO DE GALÁPAGOS	37
2.2.1	Evolução do Setor Elétrico de Galápagos.....	37
2.2.2	A matriz elétrica de Galápagos	38
2.2.3	Usinas termelétricas nas Ilhas Galápagos	39
2.2.4	Usinas de energia renovável.....	40
2.2.5	Usuários e demanda de eletricidade na província de Galápagos	42
2.2.6	Tarifas de energia elétrica nas Ilhas Galápagos	44
2.2.7	Preços de venda pela E. E. Galápagos	44
2.2.8	Preços de compra pela E. E. Galápagos	45
2.2.9	Infraestrutura de subtransmissão/distribuição e cobertura.....	46
2.2.10	Perdas no sistema de distribuição	47
2.2.11	Qualidade do serviço técnico	48
2.2.12	Programas de eficiência energética em Galápagos.....	49
3	CAPÍTULO 3: METODOLOGIA.....	50
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO GERADOR DE ENERGIA	50
3.2	ABORDAGEM PARA O DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS GERADORES DE ENERGIA	51
3.3	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO.....	55
3.4	SIMULAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA HÍBRIDO.....	56
3.4.1	Modelagem da unidade geradora de energia solar fotovoltaica.....	56
3.4.2	Modelagem da unidade de armazenamento.....	59
3.4.3	Unidade geradora de energia (<i>back-up</i>).....	60
3.4.4	Conversor CA/CC (CONV)	62
3.4.5	Irradiação solar e carga CA	63
3.5	ESTRATÉGIA DE FUNCIONAMENTO (EF)	63

3.6	MODELAGEM MATEMÁTICA DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	65
3.6.1	Otimização por enxame de partículas (PSO)	65
3.6.2	Otimização por enxame de partículas binário (BPSO)	67
3.7	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	68
3.7.1	Vetor de decisão	69
3.7.2	Tamanho real do vetor de decisão	69
3.7.3	Funções objetivo	71
3.7.4	Restrições.....	72
3.8	ABORDAGEM MULTI-OBJEIVA	73
4	CAPÍTULO 4: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	77
4.1	DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR E CARGA CA	77
4.2	DADOS DE ENTRADA	79
4.3	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS COMPONENTES.....	79
4.4	VALORES PARA O CÁLCULO DO NPVC	80
4.5	RESULTADOS DO PSO-BPSO	82
4.6	RESULTADOS DA ABORDAGEM MONO-OBJETIVO	82
4.7	RESULTADOS DA ABORDAGEM MULTI-OBJETIVO.....	87
4.8	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO SHGE SOLAR-BATERIA- BIOGÁS	91
5	CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	92
5.1	CONCLUSÕES SETOR ELÉTRICO DE GALÁPAGOS.....	92
5.2	CONCLUSÕES DO ALGORITMO PSO-BPSO PROPOSTO	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	Erro! Indicador não definido.
	APÊNDICE A – Pré-dimensionamento do sistema híbrido gerador de energia solar- bateria-biogás.....	110
	APÊNDICE B – Código gerado no MATLAB®.....	116
	APÊNDICE D – Modelo de circuito equivalente.....	123
	APÊNDICE E – Associações de Módulos Fotovoltaicos em Série e Paralelo	126
	APÊNDICE F – Modelagem econômica.....	128
	APÊNDICE G – Estimativa do potencial do biogás nas Ilhas Galápagos.....	132
	APÊNDICE H - Detalhes dos algoritmos apresentados no Capítulo 1, Tabela 1.....	141

1 CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INFORMAÇÕES GERAIS

Declaradas em 1978 pela UNESCO como Patrimônio Natural da Humanidade, as Ilhas Galápagos, localizadas no território equatoriano, enfrentam desafios demográficos, ambientais e energéticos. De 2010 a 2015, segundo o Instituto Nacional de Estatística e Censos do Equador (INEC), a população das ilhas cresceu 9,5%, causando um crescimento médio anual de 5,58% no número de usuários que acessam o serviço elétrico e de 13,34% na demanda da energia elétrica, sendo esta última também como resultado do crescimento turístico e comercial do arquipélago (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, 2017). Assim, o Setor Elétrico de Galápagos (SEG) tem sido constantemente desafiado, uma vez que deve crescer de forma diligente e sustentável em uma região biogeográfica considerada única no mundo, devido ao elevado número de espécies endêmicas existentes no arquipélago. De acordo com o Ministério da Eletricidade e Energia Renovável (MEER), o SEG demandará 73 GWh no ano de 2025, 1,4 vezes mais que em 2016. Com o intuito de atender a essa demanda de eletricidade, surge a oportunidade de crescimento da geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis não convencionais. Nesse contexto, o MEER está apostando nos sistemas autônomos baseados em energias renováveis, e prevê um investimento de aproximadamente 144 milhões de dólares até o ano de 2025, para a implementação de seis usinas fotovoltaicas, quatro usinas eólicas e uma usina híbrida (térmica-fotovoltaica-baterias) (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, 2017).

Segundo a Agência de Regulamentação e Controle de Eletricidade (ARCONEL), o SEG é composto por quatro sistemas elétricos isolados, um sistema para cada uma das ilhas povoadas (Santa Cruz, São Cristóbal, Isabela e Floreana); e é altamente dependente dos combustíveis de origem fóssil, uma vez que 85% da energia elétrica gerada por este setor depende de termelétricas a diesel, o que as torna indispensáveis em termos de confiabilidade na prestação do serviço elétrico no arquipélago (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, 2017).

A dependência destes combustíveis fósseis coloca as ilhas em constantes riscos porque eles representam um perigo constante de poluição por vazamentos quando transportados por via marítima. Eles também contribuem para o aumento das emissões de gases de efeito estufa,

causando danos irreversíveis a esta Reserva da Biosfera¹. Por exemplo, o caso do barco Jessica de propriedade da Acotamar, em janeiro de 2001, que encalhou na entrada de Puerto Baquerizo Moreno, na Ilha de São Cristóbal. O navio transportava aproximadamente 600 toneladas (160.000 galões) de diesel e 300 toneladas (80.000 galões) de gasolina. Em decorrência do acidente, sete leões-marinhos e 17 aves (pelicanos e patolas-de-pés-azuis) foram afetados. Enquanto que na Ilha de Santa Fé, também foram danificados vários leões-marinhos, e 62% das iguanas morreram após um ano do vazamento (SANDERSON; TIERCELIN; VILLANUEVA, 2001). Outro acidente semelhante ocorreu em junho de 2011, quando 700 galões de diesel foram derramados em uma baía da Ilha de Santa Cruz, a Ilha de Galápagos mais visitada por turistas. Felizmente, neste caso, o vazamento foi controlado graças à colocação de uma barreira protetora ao redor do naufrágio, evitando danos à flora e à fauna (LLERENA-PIZARRO et al., 2019).

A partir de 2007, o governo equatoriano, profundamente preocupado com a viabilidade ecológica, econômica e social das Ilhas Galápagos, lançou a iniciativa “Zero Combustíveis Fósseis nas Ilhas Galápagos (ZCFIG)”, que visa erradicar o uso de destilados de petróleo nesta área altamente sensível, e explorar os recursos renováveis existentes no arquipélago. Assim, o cuidado com a biodiversidade das ilhas passou a ter a máxima prioridade, de acordo com os compromissos assumidos pelo Estado equatoriano com a comunidade internacional. Para isso, várias iniciativas foram estabelecidas pelo governo equatoriano como parte do programa Zero Combustíveis Fósseis nas Ilhas Galápagos, tais como: a inserção de veículos elétricos no arquipélago, bem como, a inserção de fogões por indução (ELECGALAPAGOS, 2021a). Outra iniciativa que merece destaque é o programa “RENOVA”, que visa restaurar geladeiras ineficientes. O impacto que a inserção dessas novas iniciativas causou na rede de distribuição elétrica foi amplamente avaliado por (MORALES et al., 2017). As principais desvantagens da adoção dessas políticas de baixo carbono foram apresentadas por (JAKOB, 2017). Além disso, desde o lançamento desta nova política (Zero Combustíveis Fósseis nas Ilhas Galápagos), o Setor Elétrico de Galápagos tem sido fortemente beneficiado com instalações de geração de energia não convencionais, principalmente usinas eólicas e fotovoltaicas.

De acordo com a Assembleia Nacional do Equador 2016-2040, o governo equatoriano pretende estabelecer uma política energética sustentável para os próximos anos em Galápagos. Para isso, todas as fontes alternativas de energia do arquipélago devem ser exploradas. No

¹ As reservas da biosfera são áreas de ecossistemas costeiros terrestres e marinhos que são reconhecidos internacionalmente no âmbito do programa Homem e Biosfera da UNESCO.

entanto, o SEG atualmente utiliza apenas pequenas quantidades de energia solar, eólica e biocombustíveis à base de óleo de palma, portanto, aumentar o uso desses recursos é mais que uma necessidade no arquipélago nos próximos anos. Por outro lado, a energia baseada no biogás, assim como a energia geotérmica e a energia das ondas, são fontes de energia que ainda não foram exploradas em Galápagos.

Em relação ao recurso solar nas ilhas, Galápagos está anualmente exposta a uma quantidade significativa de luz solar, principalmente nas costas da Ilha de Santa Cruz, na faixa costeira da Ilha Baltra, ao norte e ao sul da Ilha Floreana, grande parte da Ilha de São Cristóbal e, por último, o porto de Villamil, no sul da Ilha Isabela (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, 2017). De acordo com o *Global Solar Atlas* (GSA), os valores de irradiância horizontal global (GHI) em Galápagos variam entre 1.650 e 2.250 kWh/m²/ano (LLERENA-PIZARRO et al., 2019). Esses valores de GHI são maiores do que aqueles encontrados em alguns países europeus, tais como: Alemanha (900 – 1.250 kWh/m²/ano), França (900 – 1.650 kWh/m²/ano) e Espanha (1.200 – 1.850 kWh/m²/ano), países onde as usinas solares estão sendo amplamente utilizadas (NASCIMENTO, 2017). Mesmo com essa grande quantidade de luz solar, as Ilhas Galápagos possuem apenas 2,5 MWp desse tipo de energia, o que representa apenas 4,1% da potência nominal instalada no arquipélago (MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, 2017).

Por outro lado, em 2015 foram gerados 8.823 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) nas Ilhas Galápagos, um valor que representa aproximadamente 324 kg per capita por ano. Desses RSU, 1.252 toneladas não são recicláveis (CONSEJO DE GOBIERNO DEL RÉGIMEN ESPECIAL DE GALÁPAGOS, 2016), devendo ser descartados ou utilizados de maneira adequada. A Digestão Anaeróbica (DA) é uma solução satisfatória para a realização desse descarte, além de gerar biogás como principal produto (SANTOS et al., 2018). Embora a DA seja uma tecnologia avançada e amplamente utilizada no mundo, essa tecnologia ainda não foi aplicada nas Ilhas Galápagos e uma das principais razões é devido ao alto investimento e algumas experiências negativas em outras províncias do Equador (HERRERO et al., 2017).

Outra fonte de geração de biogás que não foi utilizada ou estudada em Galápagos é o esterco bovino. De acordo com a Agência de Regulação e Controle de Biossegurança e Quarentena de Galápagos (ARCBQG), o arquipélago possui cerca de 10.000 cabeças de gado distribuídas em suas quatro ilhas povoadas, o que possibilitaria o aproveitamento desse recurso em cada uma delas (LLERENA-PIZARRO et al., 2019). Os resíduos sólidos produzidos por esses animais variam de 10 a 15 kg/dia; a taxa de conversão de metano por digestão anaeróbica para este tipo de resíduo é de 0,04 m³ CH₄/kg (SALOMON; LORA, 2009). Portanto, no melhor

dos casos, com a utilização de um digestor tubular, o arquipélago teria capacidade para produzir 9.450 m³/dia de biogás, que poderia ser utilizado para a produção de eletricidade. Além do biogás, esse processo de digestão anaeróbica geraria 16.500 m³/mês de bio-fertilizante, que poderia ser comercializados no mercado agrícola (LLERENA-PIZARRO et al., 2019).

Com base nos recursos renováveis subexplorados (solar) e não explorados (biogás) nas Ilhas Galápagos, um sistema híbrido de geração solar-bateria-biogás poderia ser uma alternativa atraente para todas as ilhas povoadas do arquipélago. No entanto, a inserção de um Sistema Híbrido de Geração de Energia (SHGE) não seria novidade para as ilhas, uma vez que dois desses sistemas já se encontram em funcionamento no arquipélago. Por exemplo, o parque eólico da Ilha de São Cristóbal trabalha em conjunto com uma termelétrica a diesel, formando um sistema híbrido eólico-diesel, que combina as duas fontes mais utilizadas na maioria dos sistemas híbridos instalados na América Latina e Caribe (BORGES NETO et al., 2010). Outro exemplo de sistema híbrido instalado no arquipélago é a central híbrida localizada na Ilha Isabela, que tem uma capacidade instalada de 0,92 MWp de energia fotovoltaica, 1.625 MW de dupla energia térmica (óleo vegetal/diesel) e 258 kWh de capacidade de armazenamento em baterias de íons de lítio (LLERENA-PIZARRO et al., 2019). Conforme observado, nos dois SHGE instalados nas Ilhas Galápagos, os combustíveis fósseis estão sempre presentes, pois o uso desses combustíveis representa confiabilidade em termos de geração de eletricidade.

Portanto, o estudo e dimensionamento de um sistema híbrido de geração de energia que utiliza apenas recursos renováveis (solar e biogás), proposto neste trabalho, seria inovador nas Ilhas Galápagos. Além disso, esta proposta inovadora iria colaborar diretamente com a iniciativa zero combustíveis fósseis no arquipélago. O biogás poderia ser armazenado e usado para produzir eletricidade. O bio-fertilizante, subproduto da digestão anaeróbica, poderia ser utilizado em atividades agrícolas. A venda deste fertilizante poderia ajudar a manter os preços da eletricidade mais atraentes em comparação com os cobrados pelos sistemas tradicionais geradores de energia. A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos poderia alimentar as bombas d'água utilizadas por este mesmo setor agrícola para irrigação. Além disso, qualquer energia excedente poderia ser armazenada em um banco de baterias para o uso posterior, seja em estações de carregamento de veículos elétricos, ou para atender à demanda estimada para 2025.

Por outro lado, esta proposta também poderia acelerar a implementação de projetos que ainda não foram lançados em Galápagos, uma vez que esses projetos aumentam a demanda de eletricidade (CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD, 2013a; ELECGALAPAGOS, 2021a). Por exemplo, o projeto que incentiva o uso de veículos elétricos no arquipélago; apenas 362 carros elétricos e 786 motocicletas elétricas foram permitidas nas ilhas até 2020, conforme

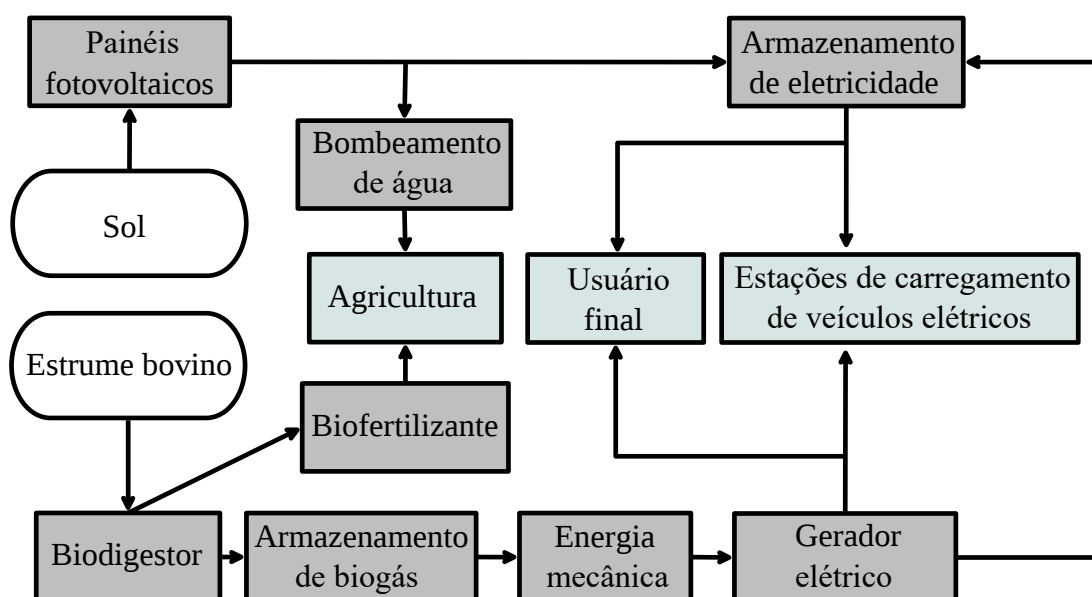
a situação atual. Outro exemplo é o Projeto Cozinha Eficiente (PCE), que visa a substituição dos fogões a gás por elétricos (ELECGALAPAGOS, 2021b).

Ainda, esta proposta permitiria um plano mais ambicioso em termos de mobilidade no setor marítimo (barcos elétricos), já que este setor é o maior consumidor de combustíveis fósseis nas ilhas (CONSEJO DE GOBIERNO DEL RÉGIMEN ESPECIAL DE GALÁPAGOS, 2021a). Os barcos elétricos poderiam ser carregados em estações de carregamento solar-biogás instaladas nos portos. Esse tipo de tecnologia não seria novidade nas ilhas, pois já existe um estudo que mostra que a utilização de embarcações movidas a energia solar fotovoltaica no arquipélago de Galápagos é tecnicamente viável, uma vez que essa tecnologia traz benefícios ambientais, econômicos e sociais para a população do arquipélago (JARA-ALVEAR et al., 2013).

Por fim, esta proposta, além de ser um mecanismo de geração de energia elétrica, pode ser considerada como um modelo para promover o desenvolvimento local nas ilhas, uma vez que permitiria a adoção de novas tecnologias no arquipélago (veículos e fogões elétricos), gerando empregos e aumentando a renda dos habitantes. Além disso, a proposta de um sistema híbrido gerador de energia considerando apenas fontes de energia renovável, é um mecanismo de desenvolvimento limpo, o que a torna mais atraente para investidores privados em busca de novas oportunidades de negócios.

A proposta do sistema híbrido solar-bateria-biogás é apresentada na Figura 1.

Figura 1. Proposta do Sistema Híbrido de Geração de Energia Renovável para as Ilhas Galápagos.



Fonte: Elaboração própria.

1.2 DIMENSIONAMENTO DE SHGE E ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

O dimensionamento adequado do SHGE apresentado na Figura 1, traz benefícios técnicos, econômicos e ambientais. No entanto, encontrar esta configuração adequada não é uma tarefa fácil, principalmente devido ao comportamento estocástico da demanda de energia CA e dos recursos renováveis, e também devido ao grande número de variáveis envolvidas no projeto do sistema (TEZER; YAMAN; YAMAN, 2017). Portanto, o dimensionamento ideal do SHGE deve ser altamente justificado em termos econômicos, técnicos e ambientais, razão pela qual tal dimensionamento requer uma abordagem multi-objetivo. Neste contexto, várias técnicas para o dimensionamento ótimo (técnicas de otimização) de um SHGE foram implementadas e apresentadas na literatura especializada, as quais estão divididas principalmente em: probabilísticas (GAZIJAANI; RAVADANEH; SALEHI, 2018), analíticas (BERNAL-AGUSTÍN; DUFO-LÓPEZ, 2009) e iterativas (RAJBONGSHI; BORGOHAIN; MAHAPATRA, 2017).

Dentre essas técnicas de otimização, a Otimização por Enxame de Partículas (PSO, *Particle Swarm Optimizer*) apareceu como uma ferramenta simples, mas com excelente desempenho na solução de problemas de otimização. Este algoritmo é comumente utilizado em problemas de um único objetivo (BONYADI; MICHALEWICZ, 2008). No entanto, com algumas modificações técnicas, esta ferramenta simples tem a capacidade de tratar adequadamente os problemas de otimização multi-objetivo (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2002). Portanto, o PSO tem sido amplamente utilizado para o dimensionamento de SHGE considerando uma abordagem multi-objetiva. Este evidente sucesso do algoritmo se deve principalmente à sua fácil implementação de código, robustez, soluções convergentes estáveis e desempenhos semelhantes aos Algoritmos Genéticos (AG) (BORHANAZAD et al. 2014).

Além disso, para melhorar os resultados obtidos com o PSO, várias combinações deste algoritmo com outros algoritmos evolutivos foram implementadas e apresentadas na literatura especializada. A Tabela 1 resume as diferentes abordagens do algoritmo PSO para o dimensionamento do SHGE, incluindo a abordagem a ser implementada nesta tese de doutorado. Os detalhes dos algoritmos são apresentados no Apêndice H.

Tabela 1. Revisão de literatura das abordagens do algoritmo PSO para o dimensionamento de SHGE.

SHGE					Algoritmo de Otimização	Referência
Unidade Renovável		Unidade Não Renovável	Unidade de Armazenamento			
PV	WT		Bateria	Hidrogênio		
-	√	-	-	√	PSO	(HAKIMI; TAFRESHI; RAJATI, 2007)
√	√	-	√	-	GA-PSO	(GHORBANI et al. 2018)
√	√	Gerador diesel	√	-	MOPSO	(BORHANAZAD et al. 2014)
√	√	-	√	√	PSO	(GARCÍA-TRIVIÑO et al. 2014)
√	√	-	√	√	PSO	(ATHARI; ARDEHALI, 2016)
√	√	-	√	-	MPSO	(MALEKI; AMERI; KEYNIA, 2015)
√	√	-	√	-	PSO	(ASKARZADEH; COELHO, 2015)
√	√	Microturbina	√	-	PSO e QP	(MORADI; ESKANDARI; HOSSEINIAN, 2015)
√	√	-	√	-	DMOPSO	(SHARAFI; ELMEKKAWY; BIBEAU, 2015)
√	-	Diesel-ORC	√	-	PSO	(NOGUERA et al. 2018)
√	√	Gerador diesel	√	√	PSO-GWO	(ABDELSHAFY; HASSAN; JURASZ, 2018)
√	√	-	√	-	E-PSO	(LORESTANI; ARDEHALI, 2018)
√	-	Gerador diesel	√	-	PSO-BPSO	Este tese de doutorado

Fonte: Elaboração própria.

Problemas da vida real, como o desenho de um SHGE, contêm variáveis de decisão contínuas (número de componentes) e variáveis de decisão discretas (modelo dos componentes) e, devido à natureza de otimização contínua da versão simples do PSO, as soluções encontradas pelo algoritmo podem estar longe de ser aplicáveis na vida real. Por exemplo, as soluções podem não ser compatíveis com os modelos dos componentes existentes (painéis fotovoltaicos, baterias, geradores a diesel ou a biogás) no mercado local.

Para resolver este importante problema, conforme mostrado na Tabela 1, alguns autores combinam o algoritmo PSO com outros algoritmos de otimização, como por exemplo os Algoritmos Genéticos (GHORBANI et al., 2018), que é um excelente algoritmo para problemas com variáveis discretas (KACHITVICHYANUKUL, 2012). Essa combinação permite ter uma abordagem realista do problema, além de melhorar o desempenho do algoritmo PSO. No entanto, essa combinação também tem um impacto direto no custo computacional, o que é prejudicial, especialmente na otimização baseada em simulação, onde o algoritmo tem que simular o SHGE várias vezes antes de encontrar uma solução ideal. Deste ponto de vista, o PSO perde sua utilidade, uma vez que perdeu seu caráter simples, e porque os problemas de otimização poderiam ser resolvidos apenas com o algoritmo com o qual o PSO foi combinado.

Neste contexto, este trabalho de doutorado propõe manter a simplicidade do algoritmo PSO combinando a versão original do algoritmo com sua versão binária (BPSO, *Binary Particle Swarm Optimizer*) (KENNEDY; EBERHART, 1997). A função de transferência é a principal diferença entre estes dois algoritmos, PSO e BPSO, e neste trabalho é proposto utilizar uma Função de Transferência de tipo S para trabalhar com as variáveis discretas (MIRJALILI et al. 2011). Ambos algoritmos serão implementados no mesmo código no ambiente computacional MATLAB®. O uso do PSO e do BPSO, simultaneamente, complica a codificação do algoritmo. Porém, essa abordagem permite um dimensionamento do Sistema Híbrido mais realista, mantendo o custo computacional baixo, evitando soluções prematuras e com resultados próximos a outros algoritmos de alto custo computacional. Além da convergência mais rápida, em comparação com a versão original do PSO, devido ao reduzido espaço de busca do BPSO.

Portanto, na proposta do algoritmo PSO-BPSO, as variáveis de decisão contínuas e discretas são processadas de forma independente, e nenhum trabalho semelhante foi relatado na literatura com esta abordagem para o dimensionamento de sistemas geradores de energia. Sendo essa a principal contribuição desta tese de doutorado. Para a validação do algoritmo, as soluções encontradas pelo PSO-BPSO serão comparadas com os resultados de outros trabalhos apresentados na literatura especializada, bem como, com os resultados do programa computacional HOMER® (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*). Por fim, será

testado o desempenho do algoritmo desenvolvido inicialmente no dimensionamento de sistemas híbridos geradores de energia solar-bateria-diesel, e após a verificação do correto funcionamento do algoritmo proposto, os SHGE solar-bateria-biogás para as Ilhas Galápagos, no Equador, serão dimensionados.

1.3 MOTIVAÇÕES

No trabalho de doutorado “Análise Econômica e Ambiental de Sistemas de Geração Alternativa para Suprimento Energético de Carros Elétricos”, foi apresentada uma metodologia para o dimensionamento e análise de um sistema híbrido gerador de energia solar-biogás (CASTRO, 2018). Os resultados obtidos nesse trabalho mostram, principalmente, as vantagens do uso dessas duas fontes renováveis, tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista ambiental. No entanto, esse trabalho não inclui uma metodologia de otimização para dimensionar esses tipos de usinas. O próprio autor recomenda o uso de ferramentas de otimização, com intuito de melhorar os benefícios econômicos e ambientais apresentados nos resultados dessa tese de doutorado.

Por outro lado, no trabalho de doutorado “Otimização de Sistemas Híbridos de Geração de Energia Solar-Eólico-Diesel através de Métodos Metaheurísticos e Função Multi-objetivo”, foi apresentada uma abordagem determinística e probabilística para a otimização de sistemas híbridos geradores de energia, utilizando algoritmos genéticos (ROBERTS, 2016). Porém, o algoritmo apresenta altos tempos de convergência mesmo na abordagem determinística. Além disso, este algoritmo não permite a inserção de uma nova fonte renovável como o biogás. O próprio autor recomenda o uso de novas fontes de energia renovável, e hipotetiza que a implementação de outros algoritmos de otimização poderiam trazer resultados promissores e melhorar os tempos de convergência do algoritmo.

Os dois trabalhos acima apresentados são a base e a primeira motivação do presente trabalho de doutorado. O principal desafio desta tese de doutorado foi o desenvolvimento de um algoritmo capaz de projetar um sistema híbrido gerador de energia ótimo com uma abordagem realista, que satisfaça a demanda da carga CA, considerando a natureza variável das fontes de energia renovável (solar-biogás), as variações na demanda de eletricidade, e todas as variáveis contínuas e discretas que estão envolvidas no dimensionamento do sistema. Além disso, alcançar os mesmos resultados com menores tempos de convergência aos apresentados no trabalho de Roberts (ROBERTS et al., 2018; ROBERTS, et al., 2017; ROBERTS, 2016).

O *Particle Swarm Optimizer* e o *Binary Particle Swarm Optimizer* são as metaheurísticas escolhidas para este trabalho. A motivação para a escolha dessas duas metaheurísticas foi amplamente justificada na subseção anterior, e se deve basicamente à falta de trabalhos na literatura especializada que utilize essa abordagem mista no dimensionamento de sistemas híbridos geradores de energia.

A terceira motivação tem a ver com o local escolhido, as Ilhas Galápagos. A falta de pesquisas sobre questões energéticas em um lugar de importância mundial, e os atuais incentivos do governo equatoriano para explorar novas fontes de geração de energia neste arquipélago, foram a principal motivação para escolher o arquipélago como eixo principal desta tese de doutorado.

Assim, as principais contribuições desta tese de doutorado são:

O desenvolvimento de uma ferramenta simples, rápida e eficaz para o dimensionamento ideal de sistemas híbridos geradores de energia, utilizando um método metaheurístico híbrido PSO-BPSO (LLERENA-PIZARRO et al., 2020);

Os códigos em MATLAB® do PSO-BPSO e dos modelos matemáticos das unidades geradoras de energia;

O levantamento completo do Setor Elétrico de Galápagos junto com a proposta de um sistema híbrido solar-bateria-biogás, que já foi publicado pela revista internacional *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (LLERENA-PIZARRO et al., 2019).

1.4 OBJETIVOS DE PESQUISA

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma ferramenta simples, capaz de dimensionar e simular Sistemas Híbridos de Geração de Energia, priorizando o aproveitamento dos recursos energéticos locais das Ilhas Galápagos; visando o menor Valor Presente Líquido dos Custos (NPVc – *Net Present Value*), a maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica e o menor impacto ambiental. Para tanto, alguns objetivos específicos devem ser alcançados:

Levantar o estado atual do Setor Elétrico das Ilhas Galápagos;

Estudar o potencial de energia solar fotovoltaica e de biogás nas Ilhas Galápagos;

Revisar as técnicas para o dimensionamento de sistemas híbridos geradores de energia, através de métodos metaheurísticos e funções multi-objetivo;

Desenvolver uma metodologia passo-a-passo para a implementação do algoritmo híbrido PSO-BPSO para o dimensionamento do SHGE;

Modelar matematicamente e simular cada uma das unidades geradoras de energia que compõem o SHGE.

1.5 APRESENTAÇÃO INICIAL

O conteúdo desta tese de doutorado está estruturado em cinco capítulos, conforme a seguir:

O CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS, apresenta as informações gerais sobre o estado da arte do assunto estudado (Setor Elétrico de Galápagos e os métodos metaheurísticos para o dimensionamento dos Sistemas Híbridos), apresenta também as principais motivações e contribuições deste trabalho. Ainda neste capítulo, os principais objetivos a serem alcançados são apresentados. Por fim, apresenta a estrutura desta tese de doutorado.

O CAPÍTULO 2: SETOR ELÉTRICO DE GALÁPAGOS, apresenta em detalhes o estado atual de cada um dos sistemas elétricos que compõem o Sistema Elétrico de Galápagos, bem como, o perfil das Ilhas Galápagos. Ainda neste capítulo, são apresentadas também as projeções futuras do SEG até o ano de 2025. Por fim, analisa minuciosamente os principais recursos renováveis explorados e não explorados no arquipélago.

O CAPÍTULO 3: METODOLOGIA, apresenta em detalhes a metodologia aplicada para o pré-dimensionamento, dimensionamento e otimização do SHGE, bem como, todo o equacionamento necessário para implementar os modelos econômicos, técnicos e ambientais. Finalmente, este capítulo apresenta o passo a passo do desenvolvimento do algoritmo PSO-BPSO.

O CAPÍTULO 4: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, apresenta os resultados de desempenho do algoritmo desenvolvido. Em primeiro lugar, para validar o algoritmo proposto (PSO-BPSO), foram projetados sistemas híbridos geradores de energia solar-bateria e solar-bateria-diesel. Os resultados destes primeiros testes foram comparados com os resultados dos artigos apresentados na literatura especializada e com os resultados do *software* de computador HOMER®. Esta primeira parte também apresenta uma análise crítica dessas comparações. Uma vez validado o algoritmo, na segunda parte deste capítulo, são apresentados os resultados do sistema proposto nesta tese de doutorado (solar-bateria-biogás).

O CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES, apresenta as contribuições mais relevantes a partir dos resultados obtidos neste estudo, bem como, as conclusões. Sugestões de trabalhos futuros também são apresentadas neste capítulo.

Após as conclusões, todas as referências consultadas e citadas são apresentadas em ordem alfabética. Por fim, como última parte deste documento, são apresentados todos os anexos, bem como, os códigos completos gerados no MATLAB®.

5 CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES SETOR ELÉTRICO DE GALÁPAGOS

O setor de energia de Galápagos planeja fazer várias mudanças do ponto de vista operacional na próxima década. Um modelo tradicional de utilização de combustíveis fósseis gerando energia elétrica será parcialmente substituído por um modelo de geração de energia sustentável.

Atualmente, as termelétricas a diesel com capacidade instalada de 27,6 MW são a principal fonte de produção de eletricidade no arquipélago, que representa 85% de sua potência nominal instalada. Os 15% restantes são gerados a partir de parques eólicos (10,8%), plantas fotovoltaicas (4,1%) e óleos vegetais (0,1%). No entanto, as fontes de energia renováveis contribuirão mais para o SEG até 2025 com a instalação de 28,5 MW de usinas solares e eólicas. Além disso, os programas de eficiência energética em Galápagos desempenharão um papel importante no estímulo à diversificação de sua matriz energética.

Com o fim de atingir o objetivo zero combustíveis fósseis para as ilhas e diversificar a sua matriz energética, a exploração de diferentes recursos renováveis, além dos já explorados (energia solar e eólica) é de vital importância para o arquipélago. Neste sentido, Galápagos tem uma importante fonte de energia para gerar biogás a partir de esterco bovino, porém, que ainda não foi utilizado. Isso se deve aos altos custos demandados pelo uso de biodigestores para produção de biogás.

Com base nos recursos renováveis já existentes no arquipélago, um sistema de geração de energia híbrida (solar-diesel e solar-biogás) usando duas fontes potenciais que são virtualmente não exploradas em Galápagos é uma proposta muito atraente para reduzir essa alta dependência de combustíveis fósseis. Essa proposta, além de ser um mecanismo gerador de eletricidade, pode ser considerada como um modelo para promover o desenvolvimento local nas ilhas, pois permitiria a adoção de novas tecnologias no arquipélago (veículos elétricos e fogões elétricos), geraria empregos e aumentaria a renda de seus habitantes. Além disso, essa proposta é um mecanismo de desenvolvimento limpo, o que a tornaria mais atraente para investidores privados que buscam novas oportunidades de negócios.

Finalmente, políticas de desenvolvimento sustentável, programas de eficiência energética e fundos de investimentos estrangeiros para realizar novos projetos, são necessários para garantir um futuro brilhante para o setor de eletricidade em Galápagos.

5.2 CONCLUSÕES DO ALGORITMO PSO-BPSO PROPOSTO

Um algoritmo PSO-BPSO baseado em simulação para dimensionamento de sistemas de energia híbridos foi desenvolvido com sucesso. O algoritmo integra dois modelos diferentes no mesmo código: a versão original do PSO, que opera com variáveis de decisão contínuas; e a versão binária do PSO, que opera com as variáveis de decisão discretas. Este método híbrido permite uma abordagem mais realista do problema. O PSO-BPSO é usado para dimensionar diferentes configurações de SHGE para as Ilhas Galápagos no Equador. O algoritmo proposto foi implementado no MATLAB®. Os resultados encontrados pela ferramenta implementada foram comparados com os resultados apresentados pelo programa computacional HOMER® e alguns trabalhos apresentados na literatura especializada.

Primeiramente, o PSO-BPSO foi avaliado em um problema mono-objetivo. Nesta abordagem, o NPVc é a função objetivo. Duas configurações (solar-bateria e solar-bateria-diesel) de sistemas híbridos geradores de energia foram dimensionadas. Os resultados mostram que o tempo de convergência do algoritmo é de aproximadamente 4 minutos, que é o melhor tempo através da literatura comparada. Os tamanhos ótimos de SHGE são encontrados com sucesso em todos os casos. Para as Ilhas Floreana e San Cristóbal, a configuração solar-bateria é a opção mais cara devido ao superdimensionamento do banco de baterias. O NPVc é de US\$ 132.128,66 e US\$ 1.218.614,28 para Floreana e San Cristóbal, respectivamente. Por outro lado, a opção mais barata para as duas ilhas é a configuração solar-bateria-diesel. Neste caso, o NPVc é inferior aos custos da configuração solar-diesel em 11,6% para Floreana e 19,6% para San Cristóbal. Isto se deve, principalmente, à participação da unidade do gerador a diesel e à redução do banco de baterias.

Na segunda etapa, o PSO-BPSO é avaliado em um problema com abordagem multi-objetivo. Neste caso, tanto o NPVc quanto o LPSP são considerados como funções objetivo. Três soluções da frente ótima de Pareto foram analisadas para a configuração solar-bateria-diesel. O tempo de convergência do algoritmo é de 20 minutos, sendo 43 minutos mais rápido que o método comparado (NSGA-II). Além disso, os resultados mostram que a configuração ideal do sistema híbrido tem um NPVc de US\$ 106.044,72 com um LPSP de 2,23% para a Ilha Floreana, e um NPVc de US\$ 820.300,00 com um LPSP de 2,25% para a Ilha San Cristóbal. No caso em que a configuração mais barata é necessária, o LPSP deve ser aumentado. Para um LPSP de 5%, quando comparada com as soluções ideais, representa uma economia de US\$ 6.687,87 para a Ilha Floreana e US\$ 29.788,50 para a Ilha San Cristóbal.

Na Tabela 12, observa-se que os sistemas solar-bateria-biogás são mais econômicos em comparação aos sistemas solar-bateria-diesel. Comparando a Solução 1 da Ilha Floreana, observa-se que existe praticamente uma economia de US\$ 30.000,00. Conclui-se que isso ocorre principalmente devido à estratégia no dimensionamento, neste caso, com o intuito de fornecer energia à carga CA, a unidade geradora a biogás opera em sua máxima capacidade até consumir toda a produção de biogás, deixando apenas o restante da demanda ainda existente (carga CA) para que seja atendida pelas unidades solar fotovoltaica e baterias. Portanto, estas duas unidades são menores, o que faz o sistema solar-bateria-biogás ser mais barato.

Nesta mesma configuração (solar-bateria-biogás), quando comparado os resultados da Solução 3 com os resultados do programa computacional HOMER®, observa-se que no que faz referência à unidade geradora a biogás, ao conversor e ao banco de baterias, praticamente não existe diferença nos resultados. No entanto, o HOMER® dá uma solução de 1,90 kW para o gerador a biogás, o qual, na prática, não é viável, pois não é um valor comercial. Já, no caso do algoritmo proposto, este entrega um valor comercial do componente (3 kW).

Ainda na Tabela 12, no caso da Ilha São Cristóbal, observa-se que para as três soluções encontradas para as unidades solar e biogás não existe nenhuma variação. Já no caso das baterias, observa-se que, conforme o LPSP vai diminuindo, a capacidade do banco de baterias vai aumentando, o que faz com que o sistema fique cada vez mais caro.

Finalmente, conclui-se que o algoritmo proposto é uma ferramenta eficiente e eficaz para o dimensionamento de sistemas híbridos geradores de energia, tanto com abordagem mono-objetivo, quanto com abordagem multi-objetivo.

REFERÊNCIAS

ABDELSHAFY, A. M.; HASSAN, H.; JURASZ, J. Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 173, p. 331–347, Oct. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418308185>. Acesso em: 14 abr. 2021.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Clientes de suministro**. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/clientes-del-suministro-mensual/>. Acesso em: 8 maio 2018c.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Cobertura anual del servicio**. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/produccion-anual-2/>. Acesso em: 8 maio 2018d.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Estadística anual y multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano**. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Estadística-anual-y-multianual-sector-eléctrico-2016.pdf>. Acesso em: 8 maio 2018a.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Estadística anual y multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2015**. 2015. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/11/EstadísticaAnualyMultianual2015.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Ministerio de Electricidad y Energía Renovable recibe cooperación del gobierno de Japón**. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-recibe-cooperacion-del-gobierno-de-japon/>. Acesso em: 2 maio 2018e.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Pérdidas mensuales de energía eléctrica en los sistemas de distribución (GWh)**. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/perdidas/>. Acesso em: 3 maio 2018b.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Precios medios**. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/clientes-de-suministro-anual/>. Acesso em: 8 maio 2018f.

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. **Tarifa dignidad**. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/tarifa-dignidad/>. Acesso em: 8 maio 2018g.

ASAMBLEA NACIONAL. **Ley orgánica del servicio público de energía eléctrica**. Quito, Pichincha: Asamblea Nacional, [2015]. Disponível em: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/Ley-Org%C3%A1nica-del-Servicio-P%C3%BAblico-de-Energ%C3%ADa-El%C3%A9ctrica.pdf>.

Acesso em: 14 abr. 2021.

ASKARZADEH, A.; COELHO, L. S. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of Iran. **Solar Energy**, Kidlington, v. 112, p. 383–396, Feb. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X14006045>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ATHARI, M. H.; ARDEHALI, M. M. Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on-grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller. **Renewable Energy**, Oxford, v. 85, p. 890–902, Jan. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115301506>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BABU, B. C.; GURJAR, S. A novel simplified two-diode model of photovoltaic (PV) module. **IEEE Journal of Photovoltaics**, Piscataway, v. 4, n. 4, p. 1156–1161, Jul. 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6807517>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BANCO CENTRAL DEL ECUADOR. **Tasas de interés**. 2018. Disponível em: <https://contenido.bce.fin.ec/docs.php?path=/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.htm>. Acesso em: 13 nov. 2018.

BANCO INTERAMERICANO DE DESAROLLO. **Lecciones sobre la reducción de pérdidas eléctricas en Ecuador**. 2017. Disponível em: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Incrementando-la-eficiencia-del-sector-el%C3%A9ctrico-Lecciones-sobre-la-reducci%C3%B3n-de-p%C3%A9rdidas-el%C3%A9ctricas-en-Ecuador.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BARLEY, C. D.; WINN, C. B. Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems. **Solar Energy**, Kidlington, v. 58, n. 4–6, p. 165–179, Oct.–Dec. 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X96000874>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BERNAL-AGUSTÍN, J. L.; DUFO-LÓPEZ, R. Multi-objective design and control of hybrid systems minimizing costs and unmet load. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 79, n. 1, p. 170–180, Jan. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779608001673>. Acesso em 14 abr. 2021.

BINDNER, H. *et al.* **Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries**. Roskilde: Risoe-R, 2005. *E-book*.

BOEHM, F. R. **Design Analysis of Thermal Systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 1987.

BONYADI, M. R.; MICHALEWICZ, Z. Particle swarm optimization for single objective continuous space problems: a review. **Evolutionary Computation**, Cambridge, v. 25, n. 1, p. 1–54, Mar. 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7869491>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BORGES NETO, M. R. *et al.* Biogas/photovoltaic hybrid power system for decentralized energy supply of rural areas. **Energy Policy**, Kidlington, v. 38, n. 8, p. 4497–4506, Aug. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421510002776>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BORGNAKKE, C.; SONNATAG, R. **Fundamentos da termodinâmica**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

BORHANAZAD, H. *et al.* Optimization of micro-grid system using MOPSO. **Renewable Energy**, Oxford, v. 71, p. 295–306, Nov. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148114002572>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BREITENSTEIN, O. An alternative one-diode model for illuminated solar cells. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 55, p. 30–37, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021401248X>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BRIZI, F. *et al.* Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: comparison between natural gas and biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 38, p. 193–211, Oct. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114004225>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BUNDHOO, Z. M. A.; MAUTHOOR, S.; MOHEE, R. Potential of biogas production from biomass and waste materials in the small island developing state of Mauritius. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 56, p. 1087–1100, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115014094>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CASTRO, T. S. **Análise econômica e ambiental de sistemas de geração alternativa para suprimento energético de carros elétricos**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/153770>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CHEN, D. B.; ZOU, F.; WANG, J. T. A multi-objective endocrine PSO algorithm and application. **Applied Soft Computing Journal**, Amsterdam, v. 11, n. 8, p. 4508–4520, Dec. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494611003012>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CHEN, X. Y. *et al.* Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. **RSC Advances**, Cambridge, v. 5, n. 31, p. 24399–24448, Feb. 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ra/c5ra00666j#!divRelatedContent&article>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CHIANDUSSI, G. *et al.* Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications. **Computers and Mathematics with Applications**, New York, v.

63, n. 5, p. 912-942, Mar. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122111010406>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CHICHEPORTICHE, R. *et al.* Synthesis and mode of action on axonal membranes of photoactivable derivatives of tetrodotoxin. **The Journal of Biological Chemistry**, Bethesda, v. 254, p. 1552-1557, Mar. 1979. Disponível em: [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(17\)37807-9/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(17)37807-9/pdf). Acesso em: 15 abr. 2021.

CHIN, V. J.; SALAM, Z.; ISHAQUE, K. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: a review. **Applied Energy**, London, v. 154, p. 500–519, Sep. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915006455>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CLARKE, D. P.; AL-ABDELI, Y. M.; KOTHAPALLI, G. Multi-objective optimisation of renewable hybrid energy systems with desalination. **Energy**, Oxford, v. 88, p. 457–468, Aug. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215006465>. Acesso em: 14 abr. 2021.

COELLO, C. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. **Adaptation, Learning, and Optimization**, Heidelberg, v. 8, n. 3, p. 256-279, Jun. 2004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1304847>. Acesso em: 14 abr. 2021.

COELLO, A. C.; LECHUGA, M. S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization. *In: CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 2002. Honolulu. **Proceedings** [...]. Honolulu: IEEE Conference Publication. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1004388>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO DE GOBIERNO DEL RÉGIMEN ESPECIAL DE GALÁPAGOS. **Informe Galápagos 2015-2016**. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/55f05236e4b05ead54eb937d/t/5a1f1c7c9140b78aac098b2f/1511988361416/InformeGalapagos_2015-2016+FINAL+FINAL.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021a.

CONSEJO DE GOBIERNO DEL RÉGIMEN ESPECIAL DE GALÁPAGOS. **Plan estratégico participativo gobierno rural autónomo de Santa María-Floreana**. 2011. Disponível em: <https://www.gobiernogalapagos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/08/Plan-Desarrollo-Santa-Maria.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO DE GOBIERNO DEL RÉGIMEN ESPECIAL DE GALÁPAGOS. **Plan Galápagos**. 2016. Disponível em: https://www.gobiernogalapagos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/04/Plan-Galapagos-2015-2020_12.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO DE GOBIERNO DEL RÉGIMEN ESPECIAL DE GALÁPAGOS. **Plan de manejo de las áreas protegidas de Galápagos para el buen vivir**. 2014. Disponível em: http://awsassets.panda.org/downloads/_1_plan_de_manejo_del_png_2014__final_.pdf.

Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental.** Plan maestro de electrificación 2013-2022. 2013a. Disponível em: <https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-04/Vol4-Aspectos-de-sustentabilidad-y-sostenibilidad-social-y-ambiental.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Constitución de la Empresa Eléctrica Provincial Galápagos ELECGALAPAGOS.** 1999. Disponível em: <https://www.elecgapagos.com.ec/transparencia/files/LOTAIP%202013/2.%20Informaci%F3n%20Legal/A1%29%20Base%20legal/constitucion%20ELECGALAPAGOS%20S.A..pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Estudio y gestión de la demanda eléctrica.** Plan maestro de electrificación 2013-2022. 2013b. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol2-Estudio-y-gesti%C3%B3n-de-la-demanda-el%C3%A9ctrica.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Perspectiva y expansión del Sistema Eléctrico Ecuatoriano.** Plan maestro de electrificación 2013-2022. 2013d. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol3-Perspectiva-y-expansi%C3%B3n-del-sistema-el%C3%A9ctrico-ecuadoriano.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Plan maestro de electricidad 2007-2016.** Quito: Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2007. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/plan-maestro-de-electrificacion-2007-2016/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Plan maestro de electrificación 2009-2020.** 2010. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/PME0920CAP1.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Plan maestro de electrificación 2013-2022.** 2013c. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/vol1-Resumen-Ejecutivo-PME-2013-2022.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Regulación n. CONELEC 004/01.** 2012. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/02/Regulacion-No.-CONELEC-004-01.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD. **Regulación n. CONELEC - 009/06.** 2009. Disponível em: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/CONELEC-PreciosRenovables4.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

COSKUN, C. *et al.* Sensitivity analysis of implicit correlations for photovoltaic module temperature: a review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 164, p. 1474–1485,

Oct. 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617315081>. Acesso em: 14 abr. 2021.

DEB, K. *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, New York, v. 6, n. 2, p. 182–197, Apr. 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/996017>. Acesso em: 14 abr. 2021.

EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MICRO MACHINE AND HUMAN SCIENCE, 6., 1995, Nagoya. **Proceedings** [...]. Nagoya: IEEE Conference Publication, 1995. p. 39–43. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/494249>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ELECGALAPAGOS. **Programa de eficiencia energética para cocción por inducción y calentamiento de agua con electricidad en la isla san cristóbal**. Disponível em: <https://www.globalelectricity.org/content/uploads/Galapagos-local-utility-efficient-energy-findings-SPANISH.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021a.

ELECGALAPAGOS. **Resumen ejecutivo de rendición de cuentas 2015**. Disponível em: <http://www.elecgapagos.com.ec/transparencia/files/RENDICION%20DE%20CUENTAS%20PERIODO%202015/RESUMEN%20EJECUTIVO%20DE%20RENDICI%C3%93N%20E%20CUENTAS%202015.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021c.

ELECGALAPAGOS. **Resumen ejecutivo de rendicion de cuentas 2016**. Disponível em: http://www.elecgapagos.com.ec/transparencia/files/RENDICION%20DE%20CUENTAS%20PERIODO%202016/Informe_2016_ELECGALAPAGOS.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021b.

ELECGALAPAGOS. **Resumen ejecutivo de rendición de cuentas 2017**. 2017. Disponível em: <http://www.elecgapagos.com.ec/transparencia/files/RENDICION%20DE%20CUENTAS%20PERIODO%202017/Informe%20rendicion%20de%20cuenta%202017.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

EP PETROECUADOR. **Precios de venta a nivel de terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional**. 2018. Disponível em: <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/06/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-JUNIO-2019-MENSUAL-SNI-DEL-20-AL-26-DE-JUNIO-2019.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ET-TORABI, K. *et al.* Parameters estimation of the single and double diode photovoltaic models using a Gaussian Seidel algorithm and analytical method: A comparative study. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 148, p. 1041–1054, Sep. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417306039>. Acesso em: 15 abr. 2021.

GARCÍA-TRIVIÑO, P. *et al.* Long-term optimization based on PSO of a grid-connected renewable energy/battery/hydrogen hybrid system. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 39, n. 21, p. 10805–10816, Jul. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319914014128>. Acesso em: 14 abr. 2021.

GARG, H. A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, New York, v. 274, p. 292–305, Feb. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0096300315014630>. Acesso em: 14 abr. 2021.

GAZIJAANI, F. S.; RAVADANEGH, S. N.; SALEHI, J. Stochastic multi-objective model for optimal energy exchange optimization of networked microgrids with presence of renewable generation under risk-based strategies. **ISA Transactions**, Pittsburgh, v. 73, p. 100-111, Feb. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019057817306237?via%3Dihub>. Acesso em: 15 abr. 2021.

GEOPORTAL. Geoportal Ecuador – Infraestructura de Datos Espaciales. Quito: GEOPORTAL, 2017. Disponível em: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>. Acesso em: 2 maio 2018.

GHORBANI, N. *et al.* Optimizing a hybrid wind-PV-battery system using GA-PSO and MOPSO for reducing cost and increasing reliability. **Energy**, Oxford, v. 154, p. 581-591, Jul. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421732090X>. Acesso em: 14 abr. 2021.

GIOIA, G. V. *et al.* Bovine anaplasmosis and tick-borne pathogens in cattle of the Galapagos Islands. **Transboundary and Emerging Diseases**, Berlin, v. 65, n. 5, p. 1262–1271, Oct. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29566306/>. Acesso em: 14 abr. 2021.

GOOGLE MAPS. Archipelago de Galápagos. Brasil: Google Maps, 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Gal%C3%A1pagos/@-0.2556085,-90.8563138,8z/data=!4m4!3m3!1s0x9aaa92ee319f2cbf:0x95bebc63839846f2!8m1!4d-90.5>. Acesso em: 20 nov. 2018.

HAHN, H. *et al.* Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 29, p. 383–393, Jan. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113006254>. Acesso em: 14 abr. 2021.

HAKIMI, M.; TAFRESHI, S. M. M.; RAJATI, M. R. Unit sizing of a stand-alone hybrid power system using model-free optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRANULAR COMPUTING (GRC 2007), 2007, Freemont. **Proceedings [...]**. Fremont: IEEE Conference Publication, 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4403200>. Acesso em: 15 abr. 2021.

HASAN, M. A.; PARIDA, S. K. An overview of solar photovoltaic panel modeling based on analytical and experimental viewpoint. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 60, p. 75-83, Jul. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116001179>. Acesso em: 14 abr. 2021.

HERRERO, J. *et al.* **Línea base y demanda potencial técnica de biodigestores en Ecuador**: análisis del contexto y tipologías de productores. 2017. Disponível em: https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/180114_e1.1_linea_base_ecuador_biogas.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

HOMER ENERGY. **Hybrid optimization model for electric renewables**. Boulder, 2021. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>. Acesso em: 15 abr. 2021.

IGLIŃSKI, B. *et al.* Agricultural biogas plants in Poland: investment process, economical and environmental aspects, biogas potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 16, n. 7, p. 4890–4900, Sep. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112003127>. Acesso em: 14 abr. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS. Censo de Población y Vivienda-Galápagos. Quito: INEC, 2015. Disponível em: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda-galapagos/>. Acesso em: 2 maio 2018.

JAKOB, M. Energy for sustainable development Ecuador's climate targets: a credible entry point to a low-carbon economy? **Energy for Sustainable Development**, London, v. 39, p. 91–100, Aug. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082617304842>. Acesso em: 14 abr. 2021.

JARA-ALVEAR, J. *et al.* **Embarcaciones solares, una evolución al transporte marino en las islas Galápagos, Ecuador**, 2013. Disponível em: <https://docplayer.es/6569415-Embarcaciones-solares-una-evolucion-al-transporte-marino-en-las-islas-galapagos-ecuador.html>. Acesso em: 15 abr. 2021.

JONES, A.; UNDERWOOD, C. A modelling method for building-integrated photovoltaic power supply. **Building Services Engineering Research and Technology**, London, v. 23, n. 3, p. 167–177, Aug. 2002. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1191/0143624402bt0400a>. Acesso em: 14 abr. 2021.

KACHITVICHYANUKUL, V. Comparison of three evolutionary algorithms: GA, PSO, and DE. **Industrial Engineering & Management Systems**, Seoul, v. 11, n. 3, p. 215–223, Sep. 2012. Disponível em: <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201229664764585.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

KANDEMIR, E.; CETIN, N. S.; BOREKCI, S. A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 78, p. 93–112, Oct. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117305750>. Acesso em: 14 abr. 2021.

KENNEDY, J. The behavior of particles. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY PROGRAMMING**, 7., 1998, Berlin. **Proceedings** [...]. Berlin: Springer-Verlag, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BFb0040809>. Acesso em: 15 abr. 2021.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **A discrete binary version of the particle swarm algorithm**. 1997. Disponível em:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.6101&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

KENNEDY, J; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *In: ICNN'95 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS*, 1995, Perth. **Proceedings** [...]. Perth: IEEE International Conference, 1995. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/488968>. Acesso em: 15 abr. 2021.

KYOUNG CHO, J.; CHUL PARK, S.; NAM CHANG, H. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of korean food wastes. **Bioresource Technology**, Essex, v. 52, n. 3, p. 245–253, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0960852495000319#>. Acesso em: 14 abr. 2021.

LANSDALE, D. *et al.* **EcoHélice**: trabajando para un Galápagos más inteligente, más sustentable, 2015. Disponível em: https://www.galapagos.org/wp-content/uploads/2015/08/InformeGalapagos_2013-2014-10-Lansdale-article.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

LLERENA-PIZARRO, O. *et al.* A PSO-BPSO technique for hybrid power generation system sizing. **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 18, n. 8, p. 1362–1370, Aug. 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9111671>. Acesso em: 14 abr. 2021.

LLERENA-PIZARRO, O. R. *et al.* Electricity sector in the Galapagos Islands: current status, renewable sources, and hybrid power generation system proposal. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 108, n. February, p. 65–75, Jul. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119301820>. Acesso em: 14 abr. 2021.

LORESTANI, A.; ARDEHALI, M. M. Optimization of autonomous combined heat and power system including PVT, WT, storages, and electric heat utilizing novel evolutionary particle swarm optimization algorithm. **Renewable Energy**, Oxford, v. 119, p. 490–503, Apr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117312417>. Acesso em: 14 abr. 2021.

MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 36, p. 304–315, Aug. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114002950>. Acesso em: 14 abr. 2021.

MAHMOUD, Y. Computational time quantification of the single diode PV models. **In: 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)**, 2017, Amman. **Proceedings** [...]. Amman: IEEE Conference Publication, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7926022>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MALEKI, A.; AMERI, M.; KEYNIA, F. Scrutiny of multifarious particle swarm optimization for finding the optimal size of a PV/wind/battery hybrid system. **Renewable Energy**, Oxford, v. 80, p. 552–563, Aug. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115001615>. Acesso em: 14 abr. 2021.

MANWELL, J. F.; JON, G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. **Solar Energy**, Kidlington v. 50, n. 5, p. 399–405, May 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X93900602>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. **Aceite vegetal de piñon**. Quito: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2018a. Disponível em: <http://historico.energia.gob.ec/aceite-vegetal-de-pinon/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. **Galápagos se beneficia con nuevas obras eléctricas**. Quito: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2018b. Disponível em: <http://historico.energia.gob.ec/galapagos-se-beneficia-con-nuevas-obras-electricas/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. **Isabela ya cuenta con electricidad en toda la isla**. Quito: Consejo de Gobierno de Regimen Especial de Galápagos, 2014b. Disponível em: <https://www.gobiernogalapagos.gob.ec/isabela-ya-cuenta-con-electricidad-en-toda-la-isla/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. **Plan estratégico institucional 2014-2017**. 2014a. Disponível em: <http://historico.energia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/06/6.2-PLAN-ESTRAT%C3%89GICO-MAYO-2014.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MINISTERIO DE ELETRCCIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. **Plan maestro de electricidad 2016-2025**. Quito: Ministerio de Eletrccidad y Energía Renovable, 2017. Disponível em: <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/images/PME%202016-2025.pdf>. Acesso em: 8 maio 2017.

MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE. **Plan de reducción de pérdidas de energía eléctrica – (PLANREP)**. Quito: Consejo de Gobierno de Regimen Especial de Galápagos, 2014. Disponível em: <http://historico.energia.gob.ec/plan-de-reduccion-de-perdidas-de-energia-electrica-planrep-2/>. Acesso em: 15 abr. 2018c.

MIRJALILI, S. *et al.* **A study of different transfer functions for binary version of Particle Swarm Optimization**. 2011. Disponível em: <http://worldcomp-proceedings.com/proc/p2011/GEM8083.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MIRJALILI, S.; LEWIS, A. S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary particle swarm optimization. **Swarm and Evolutionary Computation**, Amsterdam, v. 9, p. 1–14, Apr. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210650212000648>. Acesso em: 14 abr. 2021.

- MIRJALILI, SEYEDALI; LEWIS, A.; DONG, J. S. Confidence-based robust optimisation using multi-objective meta-heuristics. **Swarm and Evolutionary Computation**, Amsterdam, v. 43, p. 109–126, Dec. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210650217301943>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- MOHAMED, N. *et al.* Single-diode model and two-diode model of PV modules: a comparison. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL SYSTEM, COMPUTING AND ENGINEERING, 2013, Penang. **Proceedings** [...]. Penang, 2013, p.210–214. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719960>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- MORADI, M. H.; ESKANDARI, M.; HOSSEINIAN, S. M. Operational strategy optimization in an optimal sized smart microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 1087–1095, May 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6891360>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- MORALES, D. X. *et al.* Assessment of the impact of intelligent DSM methods in the Galapagos Islands toward a Smart Grid. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 146, p. 308–320, May 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779617300603>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- MØLLER, H. B.; SOMMER, S. G.; AHRING, B. K. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 26, n. 5, p. 485–495, May 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953403001569>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- NARVAEZ, R. A.; VARGAS, G.; ESPINOZA, F. Potencial of waste-to-energy implementation in Ecuador. **International Journal of Energy Engineering**, Rosemead, v. 3, n. 6, p. 279–286, Jan. 2013. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijee.20130306.01.html>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. 2017. Disponível em: C:\Users\Omar Llerena\Downloads\energia_solar_limp.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.
- NING, J. *et al.* Simultaneous biogas and biogas slurry production from co-digestion of pig manure and corn straw: performance optimization and microbial community shift. **Bioresour. Technology**, Essex, v. 282, p. 37–47, Jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241930330X?via%3Dihub>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- NOGUERA, A. L. G. *et al.* Optimum design of a hybrid diesel-ORC/photovoltaic system using PSO: case study for the city of Cujubim, Brazil. **Energy**, Oxford, v. 142, p. 33–45, Jan. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421731681X>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- ÖZER, B. Biogas energy opportunity of Ardahan city of Turkey. **Energy**, Oxford, v. 139, p.

1144–1152, Nov. 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421731229X>. Acesso em: 14 abr. 2021.

PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N. Particle swarm optimization method in multiobjective problems. *In: ACM SYMPOSIUM ON APPLIED COMPUTING*, 2002, Madrid. **Proceedings** [...]. Madrid: Association for Computing Machinery, 2002. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/2492165_Particle_swarm_optimization_method_in_multiobjective_problems. Acesso em: 15 abr. 2021.

PAULINO, R. F. S. **Uso do biogás para produção de biohidrogênio: eletrólise versus reforma a vapor**. 2017. Tese (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/150655>. Acesso em: 15 abr. 2021.

PINHO, J. T. **Manual de implantação de sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel para geração de energia elétrica**. 2008. Disponível em: <http://docplayer.com.br/5692675-Projeto-bra-99-011-manual-de-implantacao-de-sistemas-hibridos-fotovoltaico-eolico-diesel-para-geracao-de-energia-eletrica.html>. Acesso em: 15 abr. 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014. Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

PONCE-JARA, M. A. *et al.* Electricity sector in Ecuador: an overview of the 2007-2017 decade. **Energy Policy**, Kidlington, v. 113, p. 513–522, Feb. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517307826>. Acesso em: 14 abr. 2021.

PRANITH, S.; BHATTI, T. S. Modeling and parameter extraction methods of PV modules - review. *In: International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering*, 2015, Noida. **Proceedings** [...]. Noida: IEEE Conference Publication, 2015. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7281372?section=abstract>. Acesso em: 15 abr. 2021.

PUENTE-RODRÍGUEZ, D.; BOS, A. P. (Bram). **Towards locally adapted livestock production in the Galápagos islands**. Wageningen, Oct. 2017. Disponível em:

<https://edepot.wur.nl/424924>. Acesso em: 15 abr. 2021.

RAJBONGSHI, R.; BORGOHAIN, D.; MAHAPATRA, S. Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER.

Energy, Oxford, v. 126, p. 461–474, May 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217304310>. Acesso em: 15 abr. 2021.

RAMOS-SUÁREZ, J. L. *et al.* Biogas from animal manure: a sustainable energy opportunity in the Canary Islands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 104, p. 137–

150, Apr. 2019. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211930036X>. Acesso em: 14 abr. 2021.

RHOUMA, M. B. H. *et al.* A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model. **Renewable Energy**, Oxford, v. 113, p. 885-894, Dec. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117305694>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ROBERTS, J. J. **Otimização de sistemas híbridos de geração de energia solar-eólico-diesel através de métodos metaheurísticos e função multiobjetivos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016. Disponível em:
<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/142831>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ROBERTS, J.J. *et al.* **Dimensionamiento de sistemas híbridos de generación de energía**. *Energía: investigaciones en América del Sur*, p. 109–136, Sep. 2017. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/321170485_Dimensionamiento_de_Sistemas_Hibridos_de_Generacion_de_Energia. Acesso em: 15 abr. 2021.

ROBERTS, J. J. *et al.* Robust multi-objective optimization of a renewable based hybrid power system. **Applied Energy**, London, v. 223, n. January, p. 52–68, Aug. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918305749>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ROBERTS, J. J.; CASSULA, A. M. Multi-objective optimization of a wind-solar-diesel hybrid power system. In: THE SYMPOSIUM AND WORKSHOP OF THE CONSORTIUM OF RAPID SMART GRID IMPACT (CRSGI), 5., 2016, Hammond. **Proceedings** [...]. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/311440526_Multiobjective_optimization_of_a_wind-solar-diesel_hybrid_power_system. Acesso em: 15 abr. 2021.

ROBERTS, J. J.; MENDIBURU, A. A.; CASSULA, A. M. Assessment of photovoltaic performance models for system simulation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 72, p. 1104–1123, May 2017. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116306712>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, Sep. 2009. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195340900052X>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SANDERSON, W. G.; TIERCELIN, C.; VILLANUEVA, J. **Accident of the oil tanker "Jessica" off the Galapagos Islands (Ecuador)**. European Commission DG Environment ENV.C.3. – Civil Protection EU Task Force in Galapagos, Jan. 2001. Disponível em:
https://ec.europa.eu/echo/files/civil_protection/civil/marin/reports_publications/jessica_report.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

SANTOS, I. F. S. *et al.* Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation & Recycling**, Amsterdam, v. 131, p. 54–63, Apr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344917304433>. Acesso em: 15 abr. 2021.

SAYED, M.; GHARGHORY, S. M.; KAMAL, H. A. Euclidean distance-based multi-objective Particle Swarm Optimization for optimal power plant set points. **Energy Systems**, Heidelberg, v. 7, n. 4, p. 569–583, Nov. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12667-015-0182-4#citeas>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SHARAFI, M.; ELMEKKAWY, T. Y.; BIBEAU, E. L. Optimal design of hybrid renewable energy systems in buildings with low to high renewable energy ratio. **Renewable Energy**, Oxford, v. 83, p. 1026–1042, Nov. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115004012>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 73., 1998, Anchorage. **Proceedings** [...]. Anchorage: IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1998. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/699146>. Acesso em: 15 abr. 2021.

SHONGWE, S.; HANIF, M. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods. **IEEE Journal of Photovoltaics**, Piscataway, v. 5, n. 3, p. 938–946, May 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7042254>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SILVEIRA, J. L. *et al.* Incorporation of hydrogen production process in a sugar cane industry: steam reforming of ethanol. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 71, p. 94–103, Oct. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431114005122>. Acesso em: 14 abr. 2021.

STEIN, J. S.; KLISE, G. T. **Models used to assess the performance of photovoltaic systems**. Springfield, VA: Sandia National Laboratories, 2009. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/files/documents/Models_Used_to_Assess_Performance_Photovoltaic_Systems_200907.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

SZARKA, N. *et al.* A novel role for bioenergy: a flexible, demand-oriented power-supply. **Energy**, Oxford, v. 61, p. 18–26, Nov. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544213001151>. Acesso em: 14 abr. 2021.

TEZER, T.; YAMAN, R.; YAMAN, G. Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 73, p. 840–853, Jun. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117301272>. Acesso em: 14 abr. 2021.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: overview, comparability and limitations. **Renewable and**

Sustainable Energy Reviews, Oxford, v. 28, p. 555–565, Dec. 2013.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113005534>. Acesso em: 14 abr. 2021.

UKPAI, P. A.; NNABUCHI, M. N. Comparative study of biogas production from cow dung, cow pea and cassava peeling using 45 litres biogas digester. **Advances in Applied Science Research**, London, v. 2, n. 3, p. 1864–1869, 2012. Disponível em:

<https://www.imedpub.com/articles/comparative-study-of-biogas-production-from-cow-dung-cow-pea-and-cassava-peeling-using-45-litres-biogas-digester.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021.

VITA, A. *et al.* Methanol synthesis from biogas: a thermodynamic analysis. **Renewable Energy**, Oxford, v. 118, p. 673–684, Apr. 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117311230>. Acesso em: 14 abr. 2021.

WALKER, G. Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model. **Journal of Electrical Electronics Engineering**, New York, v. 21, p. 49–56, Jan. 2001. Disponível em:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.822.3785&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021.

WANG, X. *et al.* Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw.

Bioresource Technology, Essex, v. 120, p. 78–83, Sep. 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852412009625>. Acesso em: 14 abr. 2021.

XIN, J.; CHEN, G.; HAI, Y. A Particle swarm optimizer with multi-stage linearly-decreasing inertia weight. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCES AND OPTIMIZATION, 2009, Sanya. **Proceedings** [...]. Sanya: IEEE

Conference Publication, 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5193746>. Acesso em: 15 abr. 2021.

YINGJIAN, L. *et al.* Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 6, p. 25–33, Jun. 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138814000046>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ZHANG, L.; LEE, Y. W.; JAHNG, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements. **Bioresource Technology**, Essex, v. 102, n. 8, p. 5048–5059, Apr. 2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852411001751>. Acesso em: 14 abr. 2021.