

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta tese  
será disponibilizado somente a partir  
de 01/08/2018.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**JUSTO JOSÉ ROBERTS**

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
SOLAR-EÓLICO-DIESEL ATRAVÉS DE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS  
E FUNÇÃO MULTIOBJETIVO**

**Guaratinguetá**

**2016**

JUSTO JOSÉ ROBERTS

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
SOLAR-EÓLICO-DIESEL ATRAVÉS DE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS E  
FUNÇÃO MULTIOBJETIVO

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. Agnelo Marotta Cassula**

**Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira**

**Guaratinguetá**

**2016**

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R643o | <p>Roberts, Justo José</p> <p>Otimização de sistemas híbridos de geração de energia solar-eólico-diesel através de métodos metaheurísticos e função multiobjetivos / Justo José Roberts – Guaratinguetá, 2016.</p> <p>291 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 214-233</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula</p> <p>Coorientadores: Prof. Dr. José Luz Silveira</p> <p>1. Energia – Fontes alternativas 2. Algoritmos genéticos 3. Metodos de simulação 4. Incerteza I. Título</p> <p>CDU 620.91(043)</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**JUSTO JOSÉ ROBERTS**

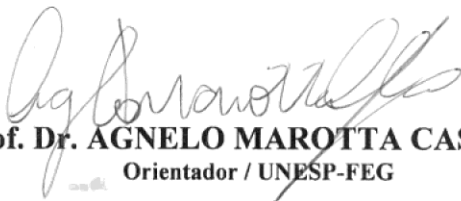
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: ENERGIA**

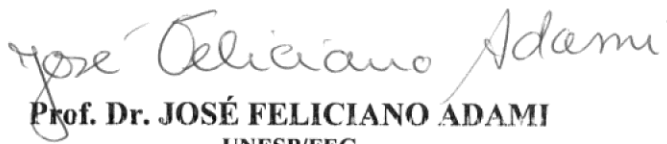
**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri**  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
**Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA**  
Orientador / UNESP-FEG

  
**Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI**  
UNESP/FEG

  
**Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI**  
UNESP/FEG

  
**Prof. Dr. EDSON DA COSTA BORTONI**  
UNIFEI

  
**Prof. Dr. RONNEY ARISMEL MANCEBO BOLOY**  
CEFET/RJ

*Agosto de 2016*

## **DADOS CURRICULARES**

**JUSTO JOSÉ ROBERTS**

|            |                                                                                                                                                                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 09.04.1983 – BUENOS AIRES / ARGENTINA                                                                                                                              |
| FILIAÇÃO   | Tomás Roberts<br>María Adela Roberts                                                                                                                               |
| 2001/2007  | Curso de Graduação em Engenharia Eletromecânica na Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina                     |
| 2010/2012  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Brasil  |
| 2012/2016  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Brasil |

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula* que jamais deixou de me incentivar, pela paciência e dedicação na conclusão desta tese de doutorado,

ao meu co-orientador, *Prof. Dr. José Luz Silveira* por ter-me acolhido no seu grupo de pesquisa na minha chegada ao Brasil,

ao meu ex-professor, *Msc. Pedro Osvaldo Prado* quem me mostrou a possibilidade de fazer este curso de pós-graduação e me brindou todo seu apoio.

aos colegas da Pós-graduação em Engenharia Mecânica da FEG pelo companheirismo e auxílio durante o tempo que trabalhei neste projeto.

à UNESP, a FEG, aos professores, aos funcionários da Pós-graduação pelo apoio.

à minha família, que sempre esteve presente ao longo deste período em que estivemos distantes fisicamente. Ao meu pai, minha mãe, minha irmã, minha avó e minha tia que sempre apoiaram incondicionalmente meus projetos de vida, que me ensinaram a valorizar as coisas simples e que possibilitaram que eu realizasse este trabalho.

“If I have seen further than others, it is by standing upon the shoulders of giants”

*Isaac Newton*

**ROBERTS J.J. Otimização de Sistemas Híbridos de Geração de Energia Solar-Eólico-Diesel através de Métodos Metaheurísticos e Função Multiobjetivo.** 2016. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

## RESUMO

Sistemas Híbridos de Geração de Energia (SHGE) baseados em fontes renováveis, quando dimensionados de forma correta, apresentam menor custo de energia gerada, maior confiabilidade no fornecimento de energia, além de benefícios ambientais, comparados a sistemas baseados em uma única fonte renovável ou em fontes tradicionais de geração. No entanto, o dimensionamento deste tipo de sistema apresenta-se como uma tarefa complexa, devido à variabilidade dos recursos renováveis e da demanda de energia, além das características não lineares de alguns dos seus componentes e a alta interação entre as variáveis do sistema. No presente trabalho propõe-se um método de otimização baseado em simulação para o dimensionamento de SHGE considerando a presença de incertezas nas variáveis de entrada. O método proposto permite dimensionar o sistema considerando aspectos econômicos, de confiabilidade e ambientais como critério de otimização, e incorporar incertezas na disponibilidade dos recursos renováveis, na demanda de energia e na indisponibilidade dos componentes sujeitos a falha. A otimização é feita por meio da metaheurística de Algoritmos Genéticos. O método de amostragem de Hipercubo Latino (LHS – *Latin Hypercube Sampling*) é utilizado para gerar os cenários de incerteza nos recursos renováveis e na demanda, enquanto que Simulação de Monte Carlo é empregada para gerar históricos de operação dos componentes do sistema. A metodologia de otimização baseada em simulação é aplicada a um caso de estudo mostrando resultados satisfatórios. A abordagem apresenta-se especialmente útil em situações onde é necessário dimensionar um sistema de forma ótima e robusta. No entanto, devido ao alto custo computacional que implica a aplicação do método, sugere-se realizar uma simulação probabilística prévia para explorar a sensibilidade das soluções obtidas com o algoritmo de otimização determinístico. Caso a média das soluções determinísticas sob incerteza ultrapasse as restrições impostas pelo usuário, justifica-se aplicar a otimização probabilística.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmo Genético, Comunidade Rural Isolada, Dimensionamento, Energia Renovável, Ferramenta Computacional, Incerteza, Simulação Probabilística.

ROBERTS J.J. **Multi-objective Optimization of Hybrid Solar-Wind-Diesel Power Systems through Metaheuristic Methods**. 2016. 275 p. Thesis (PhD in Mechanical Engineering) – Engineering Faculty – Guaratinguetá Campus, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2016.

#### ABSTRACT

When properly design, Hybrid Power Systems (HPS) based on renewable sources, present technical, economic and environmental benefits when compared to single source-based renewable power systems or traditional source-based power systems. Nonetheless, the optimal design of HPS is a daunting task, due to the stochastic behavior of the renewable resources availability and the demand to be met, the non-linear characteristic of some of the components and the high interaction between the system variables. This study proposes a simulation-based optimization approach for dimensioning HPS considering uncertainties in the input variables. The proposed methodology allows to optimal design the system considering economic, reliability and environmental criteria, while incorporating the presence of uncertainty related to the renewable resources availability, the power demand, and the availability of the components subjected to failure. The optimization is performed by means of Genetic Algorithms. The Latin Hypercube Sampling method is used to generate uncertainty scenarios related to the renewable resources and the load, while Monte Carlo simulation is employed to generate chronological system state transition process for each component of the system. The proposed methodology was applied in a case study showing satisfactory results. The simulation-based optimization approach is especially useful for dimensioning hybrid power systems that require both optimality and robustness. However, due to the method being computational intensive, it is suggested to perform a probabilistic simulation on the solutions obtained by the deterministic algorithm, in order to explore its sensitivity in the presence of uncertainty. If the average objective value of the deterministic solutions simulated under uncertainty exceeds the restrictions imposed by the user, then the increased cost of computing the probabilistic optimization is warranted.

**KEYWORDS:** Computational tool, Dimensioning, Genetic Algorithm, Isolated Rural Community, Probabilistic Simulation, Renewable Energy, Uncertainty.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1.Dimensionamento complexo de SHGE. ....                                                                                              | 32  |
| Figura 2.Classificação de abordagens para otimização de SHGE. ....                                                                           | 40  |
| Figura 3.Número de objetivos considerados e critérios de otimização mais empregados,<br>de acordo com a pesquisa bibliográfica.....          | 58  |
| Figura 4.Representação gráfica da abordagem metaheurística para otimização baseada<br>em simulação. ....                                     | 62  |
| Figura 5.Fluxograma da abordagem de otimização determinística para o problema de<br>dimensionamento de um SHGE.....                          | 66  |
| Figura 6.Método de geração de amostras para a simulação probabilística do SHGE.....                                                          | 70  |
| Figura 7.Exemplo de histórico de operação do sistema gerado pela simulação de Monte<br>Carlo cronológica.....                                | 72  |
| Figura 8.Fluxograma da abordagem de otimização probabilística para o problema de<br>dimensionamento de um SHGE.....                          | 73  |
| Figura 9.Configuração de SHGE estudada no presente trabalho. ....                                                                            | 77  |
| Figura 10. Representação gráfica do modelo de gerador solar fotovoltaico<br>implementado. ....                                               | 79  |
| Figura 11. Processo de cálculo da radiação solar global incidente numa superfície<br>inclinada.....                                          | 80  |
| Figura 12. Curva característica I-V e curva P-V para um módulo de 110 Wp na qual se<br>destacam os pontos característicos. ....              | 85  |
| Figura 13. Representação gráfica do modelo de gerador eólico implementado. ....                                                              | 89  |
| Figura 14. Representação gráfica do modelo de bateria implementado. ....                                                                     | 94  |
| Figura 15. Ilustração do modelo equivalente de dois reservatório utilizado pelo KiBaM<br>para representar o estado de carga da bateria. .... | 95  |
| Figura 16. Curva de consumo de combustível e eficiência de um moto gerador diesel<br>de 75 kW.....                                           | 101 |
| Figura 17. Diagrama em blocos dos subsistemas que compõem um SHGE. ....                                                                      | 102 |
| Figura 18. Comparação dos modelos de inversor com resultados experimentais.....                                                              | 105 |
| Figura 19. Curva de carga para um dia típico de consumidor rural isolado do Estado do<br>Pará. ....                                          | 107 |
| Figura 20. Perfis de consumo gerados com os métodos de geração sintética de curvas<br>de carga.....                                          | 110 |

|                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 21. Custos específicos dos componentes no mercado brasileiro para (a) aerogerador, (b) painéis fotovoltaicos, (c) moto gerador diesel, (d) bateria, (e) inversor.....                                              | 119 |
| Figura 22. Estrutura geral do algoritmo de simulação do SHGE.....                                                                                                                                                         | 124 |
| Figura 23. Resultados horários da simulação de um sistema solar-diesel-bateria durante 10 dias de operação.....                                                                                                           | 127 |
| Figura 24. Resultados gráficos da análise econômica para o SHGE simulado no exemplo; (a) balanço dos custos de cada componente e, (b) participação dos custos de cada componente no custo nivelado total do sistema. .... | 128 |
| Figura 25. Diagrama de funcionamento do Algoritmo Genético simples .....                                                                                                                                                  | 131 |
| Figura 26. Estrutura operacional da <i>GAtoolbox</i> .....                                                                                                                                                                | 133 |
| Figura 27. Diferença em as abordagens de otimização mono e multiobjective.....                                                                                                                                            | 141 |
| Figura 28. Representação de várias soluções num problema de otimização com dois objetivos ( $f_1$ e $f_2$ ) a ser minimizados.....                                                                                        | 143 |
| Figura 29. Procedimento do algoritmo de otimização multiobjective NSGA-II.....                                                                                                                                            | 145 |
| Figura 30. Avaliação do desempenho do AG. ....                                                                                                                                                                            | 147 |
| Figura 31. Perfil de consumo de um dia típico para o caso de (a) Vila Campinas, (b) Vila São Tomé. ....                                                                                                                   | 155 |
| Figura 32. Valores mensais das variáveis meteorológicas velocidade do vento, radiação solar e temperatura para o caso de (a) Vila Campinas, (b) Vila São Tomé.....                                                        | 156 |
| Figura 33. Geração de séries sintéticas de dados horários de carga para a Vila Campinas e a Vila São Tomé.....                                                                                                            | 157 |
| Figura 34. Evolução da função objetivo $NPV_C$ e média da população para a configuração de menor complexidade do problema de otimização mono-objetivo, (a) Vila Campinas e (b) Vila São Tomé. ....                        | 168 |
| Figura 35. Evolução da função objetivo $NPV_C$ e média da população para a configuração de maior complexidade do problema de otimização mono-objetivo, (a) Vila Campinas e (b) Vila São Tomé. ....                        | 171 |
| Figura 36. Participação de cada componente na geração mensal para os casos de estudo (a) Vila Campinas e (b) Vila São Tomé. ....                                                                                          | 175 |
| Figura 37. Participação dos custos de cada componente no custo nivelado total do sistema, casos de estudo Vila Campinas (a) e Vila São Tomé (b). ....                                                                     | 176 |

|                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 38. Evolução da fronteira de Pareto para o problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ e minimização do $LPS$ , caso Vila Campinas. ....                                                                | 183 |
| Figura 39. Fronteira de Pareto da última geração para o problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ e minimização do $LPS$ , caso Vila Campinas. ....                                                          | 183 |
| Figura 40. Evolução da fronteira de Pareto para o problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ e minimização das $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....                                                            | 187 |
| Figura 41. Fronteira de Pareto da última geração para o problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ e minimização das $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....                                                      | 187 |
| Figura 42. Evolução da fronteira de Pareto para o problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ , minimização do $LPS$ e minimização das $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....                                     | 191 |
| Figura 43. Fronteira de Pareto da última geração para o problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ , minimização do $LPS$ e minimização das $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....                               | 191 |
| Figura 44. Projeções nos planos ortogonais das soluções da fronteira de Pareto para o problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ , minimização do $LPS$ e minimização das $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. .... | 192 |
| Figura 45. Variabilidade das soluções determinísticas sob a influência de incertezas, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ e minimização do $LPS$ , caso Vila Campinas.....                              | 197 |
| Figura 46. Funções densidade de probabilidade das soluções determinísticas sob a influência de incertezas, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ e minimização do $LPS$ , caso Vila Campinas. ....        | 198 |
| Figura 47. Funções densidade de probabilidade das soluções determinísticas sob a influência de incertezas, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....     | 199 |
| Figura 48. Funções densidade de probabilidade das soluções determinísticas sob a presença de incertezas, problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....      | 200 |

|                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 49. Fronteira de Pareto determinística e probabilística, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ e minimização do $LPS$ , caso Vila Campinas. ....                                                              | 202 |
| Figura 50. Fronteira de Pareto determinística e probabilística, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....                                                           | 204 |
| Figura 51. Fronteira de Pareto determinística e probabilística, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ , minimização do $LPS$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas.....                                     | 206 |
| Figura 52. Projeções nos planos ortogonais da fronteira de Pareto determinística e probabilística, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ , minimização do $LPS$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. .... | 207 |

## LISTA DE TABELAS

|            |                                                                                                                                                                                                          |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1.  | Resultados da pesquisa bibliográfica (continua). .....                                                                                                                                                   | 55  |
| Tabela 1.  | Resultados da pesquisa bibliográfica (continuação).....                                                                                                                                                  | 56  |
| Tabela 1.  | Resultados da pesquisa bibliográfica (conclusão). .....                                                                                                                                                  | 57  |
| Tabela 2.  | Indicadores mais comumente adotados como critério de otimização, de acordo com a pesquisa bibliográfica.....                                                                                             | 59  |
| Tabela 3.  | Fatores utilizados para o cálculo das emissões no ciclo de vida do sistema híbrido.....                                                                                                                  | 115 |
| Tabela 4.  | Combinação de tipo de representação de variáveis. ....                                                                                                                                                   | 134 |
| Tabela 5.  | Parâmetros do AG mono-objetivo utilizados na resolução de problemas com restrições. ....                                                                                                                 | 149 |
| Tabela 6.  | Configuração dos problemas de otimização mono-objetivo implementadas para comparação com o HOMER®.....                                                                                                   | 163 |
| Tabela 7.  | Parâmetros do AG mono-objetivo utilizados na simulação. ....                                                                                                                                             | 164 |
| Tabela 8.  | Resultados da otimização mono-objetivo, comparação dos resultados obtidos pelo método AG proposto e o software HOMER®.....                                                                               | 165 |
| Tabela 9.  | Configuração de maior complexidade dos problemas de otimização mono-objetivo para os casos estudados. ....                                                                                               | 170 |
| Tabela 10. | Resultados numéricos para a configuração de maior complexidade do problema de otimização mono-objetivo. ....                                                                                             | 173 |
| Tabela 11. | Configuração dos problemas de otimização multiobjetivo aplicados ao caso de estudo Vila Campinas. ....                                                                                                   | 178 |
| Tabela 12. | Parâmetros do algoritmo NSGA-II utilizado nos problemas de otimização multiobjetivo para o caso de estudo Vila Campinas.....                                                                             | 179 |
| Tabela 13. | Caraterísticas de 5 soluções de interesse da última geração no problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ e minimização do $LPS$ , caso Vila Campinas. ....                            | 184 |
| Tabela 14. | Caraterísticas de 5 soluções não dominadas da última geração no problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas.....                         | 188 |
| Tabela 15. | Caraterísticas de 4 soluções não dominadas da última geração no problema de otimização multiobjetivo, minimização do $NPV_C$ , minimização do $LPS$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. .... | 193 |

|                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 16. Parâmetros utilizados na geração de cenários de incerteza para o caso de estudo Vila Campinas. ....                                                                                                                                    | 195 |
| Tabela 17. Soluções determinísticas avaliadas probabilisticamente para cada configuração do problema de otimização multiobjetivo. ....                                                                                                            | 196 |
| Tabela 18. Comparação entre soluções de interesse obtidas pelo algoritmo determinístico e probabilístico, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ e minimização do $LPS$ , caso Vila Campinas.....                            | 203 |
| Tabela 19. Comparação entre soluções de interesse obtidas pelo algoritmo determinístico e probabilístico, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. ....                        | 205 |
| Tabela 20. Comparação entre soluções de interesse obtidas pelo algoritmo determinístico e probabilístico, problema de otimização multiobjetivo minimização do $NPV_C$ , minimização do $LPS$ e minimização do $EMCO_2$ , caso Vila Campinas. .... | 208 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| Símbolo | Descrição                                                                                     | Unidade            |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| AG      | Algoritmo Genético                                                                            | --                 |
| BT      | Bateria                                                                                       | --                 |
| CC      | Estratégia de operação Ciclo de Carga                                                         | --                 |
| CONV    | Conversor                                                                                     | --                 |
| DG      | Grupo Moto Gerador                                                                            | --                 |
| DIC     | Duração de interrupção individual por unidade consumidora                                     | [interrupções/ano] |
| DMIC    | Duração de interrupção contínua por unidade consumidora                                       | [h]                |
| FC      | Célula de Combustível                                                                         | --                 |
| FIC     | Frequência de interrupção individual por unidade consumidora                                  | [interrupções]     |
| LCOE    | Custo Nivelado de Energia ( <i>Levelized Cost of Energy</i> )                                 | [US\$/kWh]         |
| LPS     | Perda no fornecimento de energia à carga                                                      | [kW]               |
| LPSP    | Probabilidade de Perda no Fornecimento de Energia ( <i>Loss of Power Supply Probability</i> ) | [%]                |
| MPPT    | Seguidor do ponto de máxima potência ( <i>Maximum Power Point Tracker</i> )                   | --                 |
| NOCT    | Temperatura Nominal de Operação da Célula ( <i>Normal Operating Cell Temperature</i> )        | [°C]               |
| NPV     | Valor Presente Líquido ( <i>Net Present Value</i> )                                           | [US\$]             |
| NSGA    | <i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm</i>                                                 | --                 |
| NSGA-II | <i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>                                              | --                 |
| PV      | Sistema solar fotovoltaico / Geração solar fotovoltaica                                       | --                 |
| SD      | Estratégia de operação Seguimento da Demanda                                                  | --                 |
| SHGE    | Sistema Híbrido de Geração de Energia                                                         | --                 |
| SMC     | Simulação de Monte Carlo                                                                      | --                 |
| WT      | Gerador Eólico / turbina eólica / aerogerador                                                 | --                 |
| LHS     | Hipercubo Latino (LHS – <i>Latin Hypercube Sampling</i> )                                     | --                 |
| UD      | estratégia programada definida pelo usuário                                                   | --                 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo              | Descrição                                                    | Unidade    |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|------------|
| $a$                  | Fator de idealidade modificado                               | [V]        |
| $b$                  | Fator de operador mutação não-uniforme                       | --         |
| $BT_{autonomy}$      | Autonomia do banco de baterias                               | [h]        |
| $c$                  | Razão de capacidade do modelo de bateria KiBaM               | --         |
| $C_{bt\_max\_cap}$   | Capacidade de corrente máxima da bateria                     | [Ah]       |
| $chromLength$        | Longitude do cromossomo do AG                                | --         |
| $C_{icap}$           | Investimento inicial                                         | [US\$]     |
| $C_{level,tot}$      | Custo anual equivalente                                      | [US\$/ano] |
| $C_{operating}$      | Custos operativos                                            | [US\$/ano] |
| $C_p$                | Coeficiente de potência ou eficiência do rotor da WT         | --         |
| $CO_{2-eq}$          | Dióxido de carbono equivalente                               | [kg]       |
| $CRF(\cdot)$         | Fator de recuperação de capital                              | --         |
| (det.)               | De carácter determinístico                                   | --         |
| $DG_{oh}$            | Horas de operação do DG                                      | [h/ano]    |
| $diff\ 2Opt$         | Diferença entre valor calculado e ótimo conhecido            | --         |
| $DOD$                | Profundidade de descarga                                     | [%]        |
| $DownTime$           | Estado de substituição/reparação do componente               | --         |
| $d_r$                | Taxa de juros real                                           | [%]        |
| $(dT/dz)_{std}$      | Gradiente térmica em condições padrão                        | [K/m]      |
| $Ec$                 | Estratégia de operação do SHGE                               | --         |
| $Ec_{min}, Ec_{max}$ | Limites inferior e superior da estratégia de operação        | --         |
| $\tilde{E}(G)$       | Estimativa do valor esperado                                 | --         |
| $E_{load}$           | Energia demandada pela carga                                 | [kWh/ano]  |
| $EMCO_{2,adm}$       | Quantidade máxima de $CO_{2-eq}$ emitido na operação do SHGE | [kg/ano]   |
| $E_{tot\_hps}$       | Energia total gerada pelo SHGE                               | [kWh]      |
| $F$                  | Espaço de busca de soluções factíveis, $F \subseteq S$       | --         |
| $F_0$                | Ordenada na origem da curva de consumo do DG                 | [L/h/kW]   |
| $F_1$                | Inclinação da curva de consumo do DG                         | [L/h/kW]   |
| $F_{c-g}$            | Fator de vista para o solo                                   | --         |
| $F_{dg}$             | Consumo horário de combustível do DG                         | [L/h]      |

| Símbolo         | Descrição                                                                      | Unidade             |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $F_{dg,adm}$    | Quantidade máxima de consumo de combustível por ano                            | [L/ano]             |
| $f_{exess}$     | Razão entre o excesso de energia e o total de energia gerada pelo sistema      | [%]                 |
| $f_{exess,adm}$ | Valor admissível da energia excedente                                          | [%]                 |
| $f_m(\vec{x})$  | Função objetivo de ordem $m$                                                   | --                  |
| $f_{ren}$       | Fração de energia renovável                                                    | [%]                 |
| $f_{ren,min}$   | Valor mínimo da participação da geração renovável                              | [%]                 |
| $f(\vec{x})$    | Função objetivo do problema de otimização                                      | --                  |
| $g$             | Aceleração da gravidade                                                        | [m/s <sup>2</sup> ] |
| $g_j(\vec{x})$  | Função restrição de desigualdade de ordem $j$                                  | --                  |
| $h_1, h_2$      | Nível dos reservatórios carga disponível e limitada do modelo de bateria KiBaM | --                  |
| $h_k(\vec{x})$  | Função restrição de igualdade de ordem $k$                                     | --                  |
| $I_0$           | Radiação solar extraterrestre horária                                          | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_b$           | Radiação solar direta horária incidente numa superfície horizontal             | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_d$           | Radiação solar difusa horária incidente numa superfície horizontal             | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_H$           | Radiação solar global horária incidente numa superfície horizontal             | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_L$           | Corrente fotogerada                                                            | [A]                 |
| $I_{mp}$        | Corrente de potência máxima do módulo PV                                       | [A]                 |
| $I_o$           | Corrente de saturação reversa do diodo                                         | [A]                 |
| $I_{sc}$        | Corrente de curto circuito do módulo PV                                        | [A]                 |
| $i(t)$          | Corrente de descarga                                                           | [A]                 |
| $I_T$           | Radiação solar global horária incidente numa superfície inclinada              | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_{T,b}$       | Radiação solar direta horária incidente numa superfície inclinada              | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_{T,d}$       | Radiação solar difusa incidente numa superfície inclinada                      | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $I_{T,refl}$    | Radiação solar refletida horária incidente numa superfície inclinada           | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $J$             | Numero de restrições de desigualdade                                           | --                  |
| $k$             | Taxa de condutância do modelo de bateria KiBaM                                 | [1/h]               |
| $K$             | Numero de restrições de igualdade                                              | --                  |
| $k_b$           | Constante de Boltzmann                                                         | [J/K]               |

| Símbolo                        | Descrição                                                               | Unidade |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------|
| $k_T$                          | Índice de claridade horário                                             | --      |
| $L_{AC}$                       | Carga AC                                                                | --      |
| $L_{mean}$                     | Potência média demandada pela carga                                     | [kW]    |
| $LPSP_{adm}$                   | Valor admissível da LPSP                                                | [%]     |
| $LT_{bt\_exp}$                 | Tempo de vida esperado de uma bateria                                   | [ano]   |
| $LT_{bt\_float}$               | Tempo de vida flutuante ( <i>float life</i> ) da bateria                | [ano]   |
| $LT_{proj}$                    | Tempo de duração do projeto                                             | [ano]   |
| $M$                            | Numero de objetivos                                                     | --      |
| $maxGen$                       | Número máximo de gerações do AG                                         | --      |
| $MTBF_i$                       | Tempo médio entre falhas do componente i-ésimo                          | [h]     |
| $MTTR_i$                       | Tempo médio para reparo do componente i-ésimo                           | [h]     |
| $n$                            | Número de variáveis no problema de otimização                           | --      |
| $N_{best}$                     | Melhores indivíduos da população                                        | --      |
| $N_{bt\_p,min}, N_{bt\_p,max}$ | Quantidade mínima e máxima de baterias em paralelo                      | --      |
| $N_{bt\_tot}$                  | Quantidade total de baterias no banco de baterias                       | --      |
| $N_{bt\_p}$                    | Número de baterias em paralelo do banco de baterias                     | --      |
| $N_{bt\_s}$                    | Número de baterias em série do banco de baterias                        | --      |
| $N_{conv}$                     | Número de conversores                                                   | --      |
| $N_{conv,min}, N_{conv,max}$   | Quantidade mínima e máxima de conversores                               | --      |
| $n_d$                          | Fator de idealidade do diodo                                            | --      |
| $N_{dg}$                       | Número de moto geradores                                                | --      |
| $N_{dg,min}, N_{dg,max}$       | Quantidade mínima e máxima de moto geradores                            | --      |
| $n_p$                          | Número de soluções que dominam a solução $p$                            | --      |
| $N_{pop}$                      | Tamanho da população                                                    | --      |
| $N_{pv}$                       | Número de módulos fotovoltaicos                                         | --      |
| $NPV_C$                        | Valor Presente Líquido dos Custos ( <i>Net Present Value of costs</i> ) | [US\$]  |
| $NPV_{C,adm}$                  | Valor admissível de $NPV_C$                                             | [US\$]  |
| $N_{pv,min}, N_{pv,max}$       | Quantidade mínima e máxima de módulos fotovoltaicos                     | --      |
| $N_s$                          | Número de células fotovoltaicas em série                                | --      |
| $N_{samp}$                     | Número de amostras geradas aleatoriamente                               | --      |
| $N_{wt}$                       | Número de turbinas eólicas                                              | --      |

| Símbolo                  | Descrição                                                                                         | Unidade |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $N_{wt,min}, N_{wt,max}$ | Quantidade mínima e máxima de turbinas eólicas                                                    | --      |
| $p$                      | Pressão atmosférica                                                                               | [Pa]    |
| $P^*$                    | Conjunto de soluções ótimas de Pareto                                                             | --      |
| $p_0$                    | Pressão nas condições padrão                                                                      | [Pa]    |
| $P_{bt\_need}$           | Potência requerida pela bateria ou fornecida à bateria que surge do balanço energético do sistema | [kW]    |
| $PCI_{comb}$             | Poder calorífico inferior do combustível                                                          | [MJ/kg] |
| $P_{dg}$                 | Potência gerada pelo DG                                                                           | [kW]    |
| $P_{dg\_min}$            | Potência mínima de operação do DG                                                                 | [kW]    |
| $P_{dgr}$                | Potência nominal do DG                                                                            | [kW]    |
| $PF^*$                   | Imagem do conjunto ótimo de Pareto (fronteira de Pareto)                                          | --      |
| $P_{gen}$                | Potência gerada instantânea                                                                       | [kW]    |
| $P_{load}$               | Potência demandada pela carga                                                                     | [kW]    |
| $p_m$                    | Taxa ou probabilidade de mutação                                                                  | [%]     |
| $P_{mp}$                 | Potência máxima do módulo PV                                                                      | [W]     |
| $popSize$                | Tamanho da população do AG                                                                        | --      |
| $p_r$                    | Taxa ou probabilidade de recombinação                                                             | [%]     |
| $P_{ren}$                | Potência gerada a partir de fontes renováveis                                                     | [kW]    |
| (prob.)                  | De caráter probabilístico                                                                         | --      |
| $P_t$                    | População de pais utilizada no NSGA-II                                                            | --      |
| $P_{wt}$                 | Potência mecânica obtida pelo rotor do aerogerador                                                | [kW]    |
| $P_{wt,r}$               | Potência nominal da turbina eólica                                                                | [kW]    |
| $P_{wt,corr}$            | Potência turbina eólica corrigir em por altitude do local                                         | [kW]    |
| $q$                      | Carga eletrônica                                                                                  | [C]     |
| $Q_{bt}$                 | Quantidade total de carga (energia) armazenada na bateria em qualquer intervalo de tempo          | [kWh]   |
| $Q_{bt1}, Q_{bt2}$       | Quantidade de carga nos reservatório de carga disponível e limitada                               | [kWh]   |
| $q_{bt1}, q_{bt2}$       | Quantidade de carga nos reservatório de carga disponível e limitada, valores instantâneos         | [kWh]   |
| $Q_{bt\_max}$            | Capacidade de carga máxima do banco de baterias                                                   | [kWh]   |
| $Q_{bto}$                | Quantidade total de carga armazenada na bateria no início do intervalo de tempo                   | [kWh]   |
| $Q_{bt1o}$               | Carga disponível na bateria no início do intervalo de tempo                                       | [kWh]   |
| $Q_{bt\_life\_thr}$      | Energia total ciclada até atingir a vida útil da bateria                                          | [kWh]   |

| Símbolo       | Descrição                                                                                                                                      | Unidade      |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| $Q_{bt\_thr}$ | Energia total ciclada pela bateria por ano                                                                                                     | [kWh/ano]    |
| $Q_t$         | População de filhos utilizada no NSGA-II                                                                                                       | --           |
| $R$           | Constante dos gases                                                                                                                            | [J/kg·K]     |
| $r_b$         | Razão entre a radiação incidente numa superfície inclinada e a radiação incidente numa superfície horizontal na ausência da atmosfera da Terra | --           |
| $R_s$         | Resistência em série do circuito equivalente da célula                                                                                         | [ $\Omega$ ] |
| $R_{sh}$      | Resistência em paralelo do circuito equivalente da célula                                                                                      | [ $\Omega$ ] |
| $R_t$         | População combinada utilizada no NSGA-II                                                                                                       | --           |
| $S$           | Espaço de busca das variáveis de decisão, $S \subseteq \Re^n$                                                                                  | --           |
| $SOC$         | Estado de Carga ( <i>State of Charge</i> ) das baterias                                                                                        | [%]          |
| $SOC_{min}$   | Mínimo estado de carga recomendável para a bateria                                                                                             | [%]          |
| $SOC_{sp}$    | Set point para o estado de carregamento máximo do banco de baterias                                                                            | [%]          |
| $S_p$         | Conjunto das soluções que são dominadas pela solução $p$                                                                                       | --           |
| $S_r$         | Fator de seleção utilizado no operador Coello Coello e Montes                                                                                  | --           |
| $strLength$   | Número mínimo de bits do gene do AG                                                                                                            | --           |
| $T$           | Período de tempo considerado para a análise                                                                                                    | [h]          |
| $T_0$         | Temperatura nas condições padrão                                                                                                               | [K]          |
| $T_a$         | Temperatura ambiente                                                                                                                           | [°C], [K]    |
| $T_{bt}$      | Modelo de bateria, BT                                                                                                                          | --           |
| $T_c$         | Temperatura da célula fotovoltaica em condições operacionais                                                                                   | [°C]         |
| $T_{conv}$    | Modelo de conversor, CONV                                                                                                                      | --           |
| $T_{dg}$      | Modelo de moto gerador DG                                                                                                                      | --           |
| $T_{pv}$      | Modelo de painel PV                                                                                                                            | --           |
| $T_{wt}$      | Modelo de turbina eólica, WT                                                                                                                   | --           |
| $U$           | Velocidade média do ar a montante das pás do rotor                                                                                             | [m/s]        |
| $u$           | Velocidade instantânea do vento à altura do rotor do aerogerador                                                                               | [m/s]        |
| $U_{ci}$      | Velocidade de vento mínima para que o rotor comece gerar energia elétrica                                                                      | [m/s]        |
| $U_{co}$      | Velocidade máxima de operação segura do aerogerador                                                                                            | [m/s]        |
| $U_0$         | Velocidade média do ar a jusante das pás do rotor                                                                                              | [m/s]        |
| $UpTime$      | Estado de operação do componente                                                                                                               | --           |
| $U_r$         | Velocidade de vento na qual a turbina entrega a potência nominal                                                                               | [m/s]        |

| Símbolo              | Descrição                                                               | Unidade |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------|
| $U_{ref}$            | Velocidade do vento à altura de referência                              | [m/s]   |
| $U_{rot}$            | Velocidade do vento à altura do rotor                                   | [m/s]   |
| $V_{bt}$             | Tensão nominal de cada bateria individual                               | [V]     |
| $V_{dc}$             | Tensão do barramento de DC                                              | [V]     |
| $V(G)$               | Variância da função teste                                               | --      |
| $V_{mp}$             | Tensão de potência máxima do módulo PV                                  | [V]     |
| $V_{oc}$             | Tensão de circuito aberto do módulo PV                                  | [V]     |
| $\vec{x}$            | Vetor solução de dimensão $n$ , $\vec{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \Re^n$ | --      |
| $x_i$                | Solução de ordem $i$ , $x_i \in \vec{x}$                                | --      |
| $x_i^{lb}, x_i^{ub}$ | Limites inferior e superior da variável de decisão $x_i$                | --      |
| $z_0$                | Comprimento de rugosidade superficial do terreno                        | [m]     |
| $z_h$                | Altitude sobre o nível do mar                                           | [m]     |
| $z_{ref}$            | Altura de medição                                                       | [m]     |
| $z_{rot}$            | Altura do rotor do aerogerador                                          | [m]     |

## LISTA DE LETRAS GREGAS

| Símbolo                      | Descrição                                                 | Unidade               |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
| $\alpha$                     | Parâmetro do operador cruzamento BLX- $\alpha$            | --                    |
| $\alpha_w$                   | Coeficiente de extrapolação da velocidade do vento        | --                    |
| $\beta$                      | Ângulo de inclinação da superfície respeito da horizontal | [°]                   |
| $\beta_c$                    | Fator de convergência                                     | --                    |
| $\cos \theta$                | Cosseno do ângulo de incidência solar                     | --                    |
| $\cos \theta_z$              | Cosseno do ângulo zenital                                 | --                    |
| $\delta_d$                   | Fator de perturbação diário                               | --                    |
| $\delta_h$                   | Fator de perturbação horário                              | --                    |
| $\delta_{load}$              | Fator de perturbação método de perfil diário              | --                    |
| $\Delta t$                   | Intervalo de cálculo                                      | [h]                   |
| $\delta_t$                   | Valor de tolerância para restrições de igualdade          | --                    |
| $\varepsilon_j(\mu, \sigma)$ | Conjunto discreto de amostras aleatórias                  | --                    |
| $\varphi_i(t)$               | Fenômenos que variam com o tempo                          | --                    |
| $\varphi_l(t)$               | Série horária de demanda energética                       | [kW]                  |
| $\varphi_s(t)$               | Série horária de radiação solar                           | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| $\varphi_T(t)$               | Série horária de temperatura ambiente                     | [°C]                  |
| $\varphi_w(t)$               | Série horária de velocidade do vento                      | [m/s]                 |
| $\Phi_i(t)$                  | Histórico de estados de operação do componente            | --                    |
| $\Phi_{j,k}^{conv}(t)$       | Histórico de estados de operação do conversor             | --                    |
| $\Phi_{j,k}^{dg}(t)$         | Histórico de estados de operação do moto gerador          | --                    |
| $\Phi_{j,k}^{pv}(t)$         | Histórico de estados de operação do painel PV             | --                    |
| $\Phi_{j,k}^{wt}(t)$         | Histórico de estados de operação do aerogerador           | --                    |
| $\lambda_{fi}$               | Taxa media de falha do componente i-ésimo                 | [1/h]                 |
| $\lambda_{ri}$               | Taxa media de reparo do componente i-ésimo                | [1/h]                 |
| $\eta_{dg}$                  | Eficiência na conversão de energia do DG                  | [%]                   |
| $\xi$                        | Componente aleatória do sistema simulado                  | --                    |
| $\rho$                       | Massa específica do ar                                    | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $\rho_0$                     | Massa específica do ar nas condições padrão               | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $\rho_{comb}$                | Massa específica do combustível                           | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $\rho_g$                     | Índice de refletividade ou albedo do solo                 | --                    |
| $\sigma$                     | Desvio padrão de uma variável                             | --                    |
| $\sigma_{share}$             | Parâmetro de compartilhamento do NSGA                     | --                    |
| $\sigma_{day,noise}$         | Desvio padrão do ruído diário                             | --                    |

| Símbolo                   | Descrição                                                                         | Unidade               |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| $\sigma_{hour,noise}$     | Desvio padrão do ruído horário                                                    | --                    |
| $\theta_i(t)$             | Parâmetro com incerteza da variável i-ésima                                       | --                    |
| $\Theta_j(t)$             | Matriz de resultados do balanço energético                                        | --                    |
| $\theta_{j,k}^l(t)$       | Parâmetro com incerteza da carga                                                  | [kW]                  |
| $\theta_{j,k}^s(t)$       | Parâmetro com incerteza da radiação solar                                         | [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| $\theta_{j,k}^w(t)$       | Parâmetro com incerteza da velocidade do vento                                    | [m/s]                 |
| $\theta_{j,k}^T(t)$       | Parâmetro com incerteza da temperatura                                            | [°C]                  |
| $\mu$                     | Média de uma variável                                                             | --                    |
| $\mu(Sol)^{Pareto(det.)}$ | Média das soluções determinísticas simuladas probabilisticamente                  | --                    |
| $\Psi$                    | Operador utilizado para obter o valor determinístico de uma função probabilística | --                    |

## SUMÁRIO

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Parte I – Introdução e Revisão da Literatura.....</b>                                                    | <b>29</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                   | <b>30</b> |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....                                                                                  | 30        |
| 1.2 CARATERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....                                                                          | 32        |
| 1.3 OBJETIVO GERAL.....                                                                                     | 34        |
| 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                             | 34        |
| 1.5 CONTRIBUIÇÕES E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....                                                            | 34        |
| 1.6 ESTRUTURA DA TESE .....                                                                                 | 35        |
| <b>2 REVISÃO DA LITERATURA SOBRE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....</b> | <b>37</b> |
| 2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA .....                                              | 37        |
| 2.2 OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....                                              | 39        |
| 2.2.1 Abordagem analítica.....                                                                              | 40        |
| 2.2.2 Abordagem gráfica .....                                                                               | 42        |
| 2.2.3 Abordagem probabilística.....                                                                         | 43        |
| 2.2.4 Abordagem iterativa.....                                                                              | 44        |
| 2.2.5 Abordagem metaheurística .....                                                                        | 46        |
| 2.2.6 Abordagem híbrida.....                                                                                | 49        |
| 2.3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA A SHGE .....                                                          | 49        |
| 2.3.1 Abordagem das somas ponderadas .....                                                                  | 50        |
| 2.3.2 Abordagem $\varepsilon$ -restrito.....                                                                | 51        |
| 2.3.3 Abordagem de busca da fronteira de Pareto.....                                                        | 52        |
| 2.4 CONCLUSÕES DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....                                                              | 54        |
| <b>Parte II – Materiais e Métodos.....</b>                                                                  | <b>60</b> |
| <b>3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO .....</b>                                                              | <b>61</b> |
| 3.1 ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICA APLICADA AO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE UM SHGE .....         | 63        |
| 3.2 ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO PROBABILÍSTICA APLICADA AO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE UM SHGE .....         | 67        |

|       |                                                                                |           |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1 | Representação das incertezas.....                                              | 68        |
| 4     | <b>MÓDULO DE SIMULAÇÃO .....</b>                                               | <b>76</b> |
| 4.1   | MODELO DE GERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO .....                                     | 78        |
| 4.1.1 | Modelo de radiação solar incidente numa superfície inclinada .....             | 79        |
| 4.1.2 | Modelos de módulo fotovoltaico .....                                           | 84        |
| 4.2   | MODELO DE GERADOR EÓLICO .....                                                 | 87        |
| 4.2.1 | Extrapolação vertical da velocidade do vento .....                             | 89        |
| 4.2.2 | Curva de potência da turbina eólica .....                                      | 90        |
| 4.2.3 | Variação da massa específica do ar em função da altitude.....                  | 91        |
| 4.3   | MODELO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO.....                                        | 92        |
| 4.3.1 | Modelos de bateria disponíveis na literatura .....                             | 93        |
| 4.3.2 | Modelo de capacidade da bateria .....                                          | 94        |
| 4.3.3 | Modelo de vida útil da bateria .....                                           | 97        |
| 4.4   | MODELO DO GRUPO MOTO GERADOR .....                                             | 99        |
| 4.4.1 | Consumo de combustível e eficiência do grupo moto gerador .....                | 100       |
| 4.5   | MODELO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE POTÊNCIA .....                         | 102       |
| 4.5.1 | Controlador de carga.....                                                      | 102       |
| 4.5.2 | Seguidor de ponto de máxima potência .....                                     | 103       |
| 4.5.3 | Inversor e retificador .....                                                   | 103       |
| 4.6   | CURVA DE CARGA E DEMANDA DE ENERGIA.....                                       | 105       |
| 4.6.1 | Determinação da curva de carga .....                                           | 107       |
| 4.6.2 | Modelo de geração de curvas de carga baseado em simulação de Monte Carlo ..... | 108       |
| 4.6.3 | Modelo de geração da curva de carga baseado no perfil diário .....             | 109       |
| 4.7   | ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO.....                                | 111       |
| 4.7.1 | Tipos de estratégias de operação de SHGE .....                                 | 111       |
| 4.7.2 | Estratégia de operação “Seguimento da Demanda” .....                           | 112       |
| 4.7.3 | Estratégia de operação “Ciclo de Carga” .....                                  | 112       |
| 4.7.4 | Estratégia “Programada” .....                                                  | 113       |
| 4.8   | AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL .....                                           | 113       |
| 4.9   | MODELO DE ANÁLISE ECONÔMICA .....                                              | 115       |
| 4.9.1 | Custo dos componentes do sistema.....                                          | 118       |
| 4.10  | INTEGRAÇÃO DOS MODELOS.....                                                    | 120       |

|        |                                                                                                                        |            |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.10.1 | Índices de desempenho relacionados com a confiabilidade .....                                                          | 121        |
| 4.10.2 | Índices de desempenho relacionados à geração de energia do SHGE ...                                                    | 122        |
| 4.10.3 | Índices de desempenho relacionados ao moto gerador .....                                                               | 122        |
| 4.10.4 | Índices de desempenho relacionados ao sistema de armazenamento ...                                                     | 123        |
| 4.10.5 | Índices de desempenho relacionados com as emissões de gases poluentes ..<br>.....                                      | 123        |
| 4.10.6 | Exemplo de simulação .....                                                                                             | 125        |
| 5      | MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO .....                                                                                             | 129        |
| 5.1    | ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS A OTIMIZAÇÃO .....                                                                      | 130        |
| 5.2    | DESCRIÇÃO DA GATOOLBOX.....                                                                                            | 132        |
| 5.2.1  | Módulo definição do problema de otimização .....                                                                       | 132        |
| 5.2.2  | Módulo definição das variáveis .....                                                                                   | 134        |
| 5.2.3  | Módulo geração da população inicial.....                                                                               | 135        |
| 5.2.4  | Módulo evolução .....                                                                                                  | 135        |
| 5.2.5  | Tratamento de restrições.....                                                                                          | 139        |
| 5.2.6  | Otimização multiobjetivo .....                                                                                         | 140        |
| 5.2.7  | Computação paralela.....                                                                                               | 146        |
| 5.3    | AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA GATOOLBOX.....                                                                              | 147        |
| 5.3.1  | Problemas de otimização mono-objetivo sem restrições .....                                                             | 148        |
| 5.3.2  | Problemas de otimização mono-objetivo com restrições.....                                                              | 148        |
| 5.3.3  | Problemas de otimização multiobjetivo com restrições .....                                                             | 150        |
|        | <b>Parte III – Resultados, Discussões e Conclusões .....</b>                                                           | <b>151</b> |
| 6      | OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO COM ALGORITMOS<br>GENÉTICOS APLICADA AO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE UM<br>SHGE..... | 152        |
| 6.1    | CASOS DE ESTUDO .....                                                                                                  | 152        |
| 6.1.2  | Componentes do SHGE.....                                                                                               | 154        |
| 6.2    | OTIMIZAÇÃO MONO-OBJETIVO DE UM SHGE.....                                                                               | 158        |
| 6.2.1  | Vetor de Variáveis de Decisão do Problema de Otimização do SHGE..                                                      | 158        |
| 6.2.2  | Função Objetivo do Problema de Otimização Mono-objetivo do SHGE ....<br>.....                                          | 159        |

|       |                                                                                                                     |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.3 | Restrições do Problema de Otimização Mono-objetivo do SHGE .....                                                    | 159 |
| 6.2.4 | Resultados da otimização mono-objetivo, comparação do método<br>proposto com a ferramenta de otimização HOMER®..... | 161 |
| 6.2.5 | Resultados da otimização mono-objetivo, problema de maior<br>complexidade.....                                      | 169 |
| 6.3   | OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE UM SHGE.....                                                                            | 177 |
| 6.3.1 | Otimização multiobjetivo determinística: caso de estudo Vila Campinas ..<br>.....                                   | 179 |
| 6.3.2 | Otimização multiobjetivo probabilística: caso de estudo Vila Campinas ...<br>.....                                  | 194 |
| 7     | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....                                                                                | 209 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                                                                   | 214 |
|       | APÊNDICE A – MÉTODO DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS<br>COMPONENTES DO SHGE.....                                          | 234 |
|       | APÊNDICE B – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE EMISSÕES<br>INDIRETAS.....                                                 | 239 |
|       | APÊNDICE C – CÁLCULO DA QUANTIDADE DE POLUENTES POR<br>LITRO DE COMBUSTÍVEL (ÓLEO DIESEL).....                      | 244 |
|       | APÊNDICE D – CUSTOS ASSOCIADOS AOS COMPONENTES DO SHGE ...<br>.....                                                 | 248 |
|       | APÊNDICE E – EQUAÇÕES DO MODELO DE ANÁLISE ECONÔMICA.                                                               | 253 |
|       | APÊNDICE F – ARQUIVO DE RESULTADOS FORNECIDO PELO<br>ALGORITMO DE SIMULAÇÃO DE SHGE .....                           | 258 |
|       | APÊNDICE G – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA GATOOBOX.....                                                               | 260 |
|       | APÊNDICE H – CASOS DE ESTUDO.....                                                                                   | 278 |
|       | APÊNDICE I – CARATERÍSTICAS TÉCNICAS E ECONÔMICAS DOS<br>COMPONENTES UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DO SHGE.....         | 286 |

## **PARTE I – INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia é considerada um insumo fundamental nas atividades produtivas, tendo um importante papel no processo de desenvolvimento da humanidade. O acesso às formas modernas de energia, em particular a energia elétrica, traz uma série de benefícios sociais que melhoram a qualidade de vida da população, entre os quais se podem mencionar (REICHE; COVARRUBIAS; MARTINOT, 2000):

- Reduz a fome e melhora o acesso à água potável através de sistemas de conservação de alimentos e bombeamento de água.
- Fomenta a educação e diminui a marginalização através da luz artificial e de ferramentas de acesso à informação e comunicação.
- Melhora a igualdade de gênero, livrando às mulheres de tarefas de abastecimento de água e combustível.
- Reduz a mortalidade infantil e materna, bem como a incidência de doenças através da refrigeração de medicamentos e o acesso a modernos equipamentos médicos.
- Traz benefícios econômicos diretos e indiretos a partir do uso de eletricidade em atividades produtivas em áreas rurais, como irrigação de cultivos, conservação de alimentos, processamento da colheita e desenvolvimento de pequenas empresas, o que resulta num aumento de oportunidades de emprego para a população.

Apesar da importância do acesso à energia elétrica, ainda existe, em pleno século XXI, uma parte substancial da população mundial que não tem acesso à eletricidade. Segundo a *International Energy Agency* (NIEZ, 2010) essa parcela é de aproximadamente 22%, o equivalente a um total de 1,5 bilhões de pessoas. Deste contingente, 85% vivem em comunidades rurais situadas em regiões geograficamente isoladas, as quais, muitas vezes, são pouco povoadas ou representam uma demanda energética demasiado baixa para justificar a extensão da rede elétrica convencional.

Atualmente, a maior parte da população sem acesso à eletricidade se encontra nas regiões menos desenvolvidas do planeta, como a África e o sul da Ásia. No entanto, a América Latina não está isenta desta problemática. Países com grande extensão territorial como Argentina, Brasil e Peru possuem parte da sua população sem serviço elétrico. A busca

pela universalização do atendimento elétrico constitui um constante desafio para os governos desses países, os quais têm implantado medidas para alterar esse panorama.

O Brasil tem trabalhado largamente na expansão do acesso à energia elétrica a partir da Constituição de 1988, quando então o governo assumiu total responsabilidade para a distribuição do serviço elétrico como um serviço básico. Como consequência da forte vontade política e do financiamento suficiente, o Brasil passou de uma taxa de eletrificação de 79,9% em 1996, para 99,5% em 2012 (THE WORLD BANK, 2015). No entanto, nas zonas rurais a taxa de eletrificação cai para 88% (NIEZ, 2010). Os projetos que possibilitaram essa expansão do serviço são o programa Luz no Campo (2000-2003), seu sucessor o programa Luz para Todos e o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica).

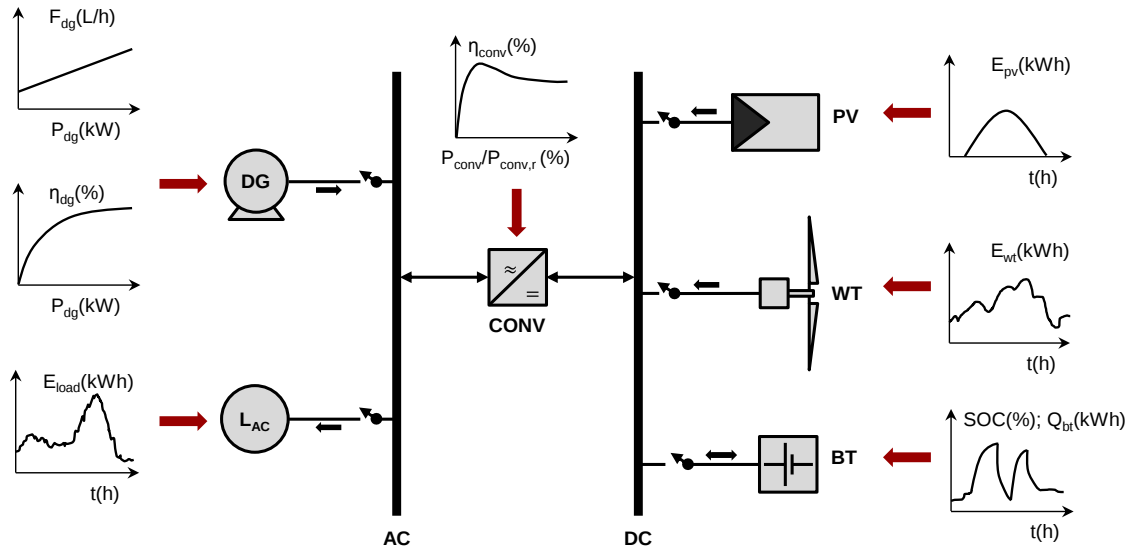
São diversas as tecnologias de geração de energia com potencial para serem utilizadas em programas de eletrificação rural, cada uma com diferentes características técnicas, custos e qualidade do serviço oferecido, que as fazem mais ou menos adequadas para cada situação. Tradicionalmente, a expansão do atendimento elétrico ocorre basicamente através da extensão de linhas de transmissão pertencentes ao sistema interligado, ou através da geração térmica de pequeno, médio e, por vezes, até mesmo de grande porte. Usualmente, a geração térmica ocorre com a instalação de grupos geradores cujo combustível é de origem fóssil (óleo diesel e gasolina, principalmente). Porém, ao mesmo tempo em que a demanda cresce, também o consumo de combustíveis fósseis aumenta. Com o aumento do consumo de combustíveis fósseis, os custos de logística, transporte e armazenamento também se elevam, assim como os efeitos negativos que provoca a queima deste tipo de combustíveis no meio ambiente.

Tais soluções, entretanto, não constituem alternativas únicas. O crescente uso de sistemas autônomos baseado em energias renováveis se configura como uma das soluções viáveis aos problemas de eletrificação em regiões afastadas da rede elétrica. O abastecimento de energia de forma autônoma se refere ao fornecimento de eletricidade de forma independente da rede de distribuição interligada. Este tipo de fornecimento de energia é adequado para pequenas comunidades rurais, onde não se tem acesso à rede elétrica, ou em locais de difícil acesso que dependem principalmente da geração diesel.

Sistemas utilizando duas ou mais fontes de energias renováveis, para suprir uma variedade de diferentes cargas, são normalmente chamados de “Sistemas Híbridos de Geração de Energia” (SHGE) (THIBAUD; ROBERTS; PRADO, 2015). Tipicamente esses sistemas funcionam isoladamente, com diferentes formas de armazenamento energético, mas também podem ser utilizados conjuntamente com fontes convencionais de energia e/ou geração a

diesel, quando for o caso. Na Figura 1 se mostra uma configuração típica de um sistema híbrido autônomo solar-eólico-diesel com armazenamento em baterias.

Figura 1. Dimensionamento complexo de SHGE.



Fonte: produção do próprio autor

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho de pesquisa aborda-se o problema de dimensionamento ótimo de Sistemas Híbridos de Geração de Energia (SHGE), isto é, sistemas que combinam duas ou mais fontes de geração de energia para suprir uma determinada carga. O sistema híbrido estudado compõe-se de geração eólica, solar fotovoltaica, sistema de armazenamento de energia em baterias eletroquímicas e ainda considera a possibilidade de um moto gerador como *backup*. Este tipo de sistema se caracteriza pelo comportamento não linear dos seus componentes, além de possuir uma grande interação entre as variáveis envolvidas; aliado ao comportamento estocástico dos recursos renováveis e da carga, que fazem do processo de dimensionamento do SHGE uma tarefa complexa. Variadas técnicas para o dimensionamento de SHGE tem sido propostas, no entanto, nota-se que não existe uma abordagem globalmente aceita para resolver o problema, sendo que muitos dos métodos propostos limitam-se às condições específicas do estudo.

Para resolver este problema propõe-se uma abordagem de otimização baseada em simulação que visa projetar de forma otimizada um SHGE solar-eólico-bateria com moto gerador de *backup*. São propostos dois métodos, sendo um método de otimização determinístico no qual o SHGE é dimensionado considerando os parâmetros de entrada constantes. O segundo método consiste numa otimização probabilística no qual se incorporam as incertezas inerentes às variáveis de entrada.

Para tal fim foi desenvolvida uma ferramenta computacional que integra um módulo de simulação e um módulo de otimização, especialmente projetados para abordar o problema de dimensionamento ótimo de SHGE.

Com relação ao modelo de simulação, foram testados vários modelos para cada componente do SHGE com o intuito de obter um modelo de simulação compatível com as necessidades do presente estudo. Em todos os modelos testados, procurou-se um balanço entre precisão e custo computacional. O resultado é um modelo de simulação de SHGE que permite explorar diferentes configurações de sistema híbrido e avaliar a sensibilidade dos parâmetros de cada componente. O modelo de simulação fornece como resultados uma série de índices de desempenho que permitem avaliar a operação do sistema híbrido de acordo com critérios técnicos, econômicos e ambientais. Esses indicadores são utilizados pelo módulo de otimização para guiar o processo de busca.

O módulo de otimização da ferramenta desenvolvida é baseado na metaheurística Algoritmos Genéticos (AGs), a qual a partir das informações fornecidas pelo módulo de

simulação procura a melhor configuração de SHGE que otimize os critérios definidos pelo usuário. Para tal fim, foi desenvolvida uma *toolbox* em Matlab® (*GAtoolbox*) que implementa um algoritmo de otimização baseado em AGs. A *GAtoolbox* foi inicialmente concebida como uma ferramenta de otimização de uso geral, e em seguida foi integrada na ferramenta de otimização baseada em simulação para resolver o problema específico de dimensionamento do SHGE. O desempenho da *GAtoolbox* foi avaliado na resolução de uma série de problemas teste, tanto problemas mono-objetivo e multiobjetivo puramente matemáticos, bem como problemas reais de engenharia, mostrando resultados satisfatórios. Os resultados mostram que a configuração de AG com codificação real, operador de recombinação BLX- $\alpha$  (ESHELMAN; SCHAFFER, 1993) com  $\alpha=0,5$  e operador de mutação não-uniforme (MICHALEWICZ, 1996) com  $b=5$  junto ao método de tratamento de restrições proposto por Coello Coello e Montes (2002) é a mais adequada para a resolução de problemas de otimização mono-objetivo com restrições. Para resolver problemas de otimização multiobjetivo, a *GAtoolbox* incorpora o algoritmo NSGA-II (DEB et al., 2002). O algoritmo multiobjetivo também foi avaliado numa série de problemas teste mostrando a capacidade do método para convergir rapidamente para as soluções não dominadas da fronteira de Pareto. A *GAtoolbox* consegue resolver satisfatoriamente não apenas problemas relativamente simples, mas também problemas com espaços de busca convexos, côncavos, não contínuos e com restrições difíceis de cumprir, assim como problemas com mais de dois objetivos.

Uma vez integrados os módulos de simulação e otimização foi possível aplicar a metodologia proposta para o dimensionamento de um SHGE. Primeiramente foi resolvido o problema para o caso mono-objetivo, a partir do qual se dimensionou o SHGE em função do Valor Presente Líquido dos custos ( $NPV_C$ ), enquanto uma série de restrições técnicas pré-estabelecidas são satisfeitas. A configuração do algoritmo incorporado na *GAtoolbox* mostrou a capacidade de resolver o problema de forma satisfatória encontrando em todas as simulações o valor ótimo global, que foi conferido através da utilização do software comercial HOMER®, o qual utiliza o método de Busca Exaustiva para realizar a otimização. A vantagem do AG em relação ao método de HOMER® ficou evidente nos tempos de processamento empregados em cada algoritmo. Sendo que nos casos estudados a abordagem de otimização baseada em AG precisou de menos de 20% do tempo utilizado pelo HOMER® para atingir os mesmo resultados. A partir dos resultados obtidos pelo algoritmo de otimização de SHGE foram identificadas algumas questões que podem ser aprimoradas em próximas versões do algoritmo. Em determinadas situações o algoritmo fornece uma solução matematicamente lógica, porém que tecnicamente pode resultar inviável. Como é o caso da

incorporação de um motor gerador para suprir a carga pico em momentos esporádicos, ficando este componente ocioso a maior parte do tempo. No entanto, o algoritmo fornece uma série de indicadores de desempenho que podem ser utilizados pelo tomador de decisão para avaliar a viabilidade técnica de cada solução.

Em seguida se utilizou a *GAtoolbox* para resolver o problema de otimização determinística multiobjetivo. O algoritmo mostrou a capacidade de encontrar soluções diversas e bem distribuídas sobre a fronteira de Pareto. Esta característica permite ao tomador de decisão ter uma visão global sobre os *trade-off* entre as diferentes soluções possíveis, constituindo uma ferramenta de tomada de decisão muito útil.

O caso de otimização multiobjetivo do custo e da energia não suprida  $\min f_m(NPV_C, LPS)$  é útil em situações nas quais se pode admitir uma confiabilidade do sistema elétrico menor do que 100%. Por exemplo, num sistema eólico ou solar existente pode-se avaliar o custo que implica incorporar maior geração renovável ou um moto gerador de *backup* para aumentar a confiabilidade do sistema.

O caso de otimização multiobjetivo do custo e das emissões do gás poluente  $\min f_m(NPV_C, EMCO_2)$  é especialmente útil quando se devem considerar restrições ambientais no processo de dimensionamento. A otimização multiobjetivo permite incluir as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente como um objetivo independente em relação ao custo. Este procedimento é uma melhor alternativa frente a abordagem na qual as emissões são consideradas dentro do cálculo econômico através de um fator de penalidade. Neste último caso, o resultado final depende fortemente do valor do fator de penalidade escolhido, e, portanto é subjetiva. No entanto, evidenciou-se que as configurações podem resultar num custo elevado caso não seja imposta uma restrição de máximo  $NPV_C$ . Isto constitui uma desvantagem desta otimização, já que muitas vezes o  $NPV_C$  se desconhece *a-priori*.

O caso de otimização de três objetivos em forma simultânea, custo, energia não suprida e emissões do gás poluente  $\min f_m(NPV_C, LPS, EMCO_2)$  permite obter uma visão global dos *trade-off* entre esses três critérios de dimensionamento. A abordagem de otimização multiobjetivo proposta elimina a intervenção subjetiva do agente decisor no processo de dimensionamento do SHGE, e fornece um amplo leque de alternativas para que o agente decisor possa escolher a melhor configuração que atenda as necessidades do projeto.

Simularam-se as soluções determinísticas obtidas com o algoritmo multiobjetivo sob a presença de incertezas. Observou-se que as soluções determinísticas apresentam uma variação no valor dos objetivos em função da configuração do sistema, i.e. os componentes que

integram o sistema, e da magnitude das incertezas. As configurações que incorporam moto geradores de *backup* se apresentam menos sensíveis à presença de incertezas; a característica despachável desta fonte de energia permite absorver melhor as variações na disponibilidade dos recursos e na demanda da carga. A média das soluções determinísticas quando avaliadas sob a presença de incertezas afasta da fronteira de Pareto determinística, evidenciando que o método de otimização deve incorporar as incertezas para se obter soluções robustas. Para solucionar este problema é proposta a abordagem de otimização probabilística, o qual modifica o algoritmo AG multiobjetivo para incorporar um método de quantificação de incertezas dentro do processo de otimização.

A aplicação do algoritmo de otimização multiobjetivo probabilístico mostrou resultados satisfatórios, gerando soluções ótimas e robustas. No entanto, cabe esclarecer que o método de otimização probabilística se apresenta como uma técnica de otimização com um custo computacional elevado. Utilizando um computador equipado com Windows 7, 64 Bits, processador AMD FX™-8150 com processador de 8 núcleos 3,6GHz e memória RAM de 16 GB, o tempo médio de simulação resultou em 15 horas para cada configuração do problema de otimização, utilizando computação paralela. É por isso que se sugere aplicar, como método de análise prévio, a técnica de simulação probabilística às soluções não dominadas da fronteira de Pareto obtidas pelo algoritmo multiobjetivo determinístico. A partir desta abordagem alternativa, a qual representam um custo computacional menor, apenas 10% do tempo gasto pelo algoritmo de otimização probabilístico, é possível observar a influência das incertezas nas soluções da fronteira de Pareto determinística. Caso a média das soluções determinísticas sob incerteza ultrapasse as restrições impostas pelo usuário, pode-se partir para a otimização probabilística a qual incorpora as incertezas nas variáveis de entrada no processo de dimensionamento do SHGE, e, portanto, assegura que as soluções obtidas se encontram dentro da região factível do espaço de busca.

Em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que se cumpriu o objetivo principal da presente pesquisa, no entanto, identificam-se os seguintes temas de pesquisa futuros:

- Estudo de outras metaheurísticas de otimização. Os AG são considerados um método clássico, já que foi um dos primeiros algoritmos desta família a ser desenvolvido. No entanto, existem outras metaheurísticas que apresentam resultados promissores. Portanto, seria interessante explorar outras técnicas de otimização metaheurística para comparar o desempenho com os AGs. Espera-se que os resultados não sejam muito diferentes dos obtidos no presente estudo, no entanto, podem existir diferenças na velocidade de convergência e no desempenho geral do algoritmo.

- Incorporação de outras fontes renováveis de geração de energia como a biomassa, o biodiesel, hidrelétrica, solar térmica e células de combustível.
- Análise da possibilidade da produção de hidrogênio como sistema alternativo de armazenamento de energia.
- Incorporação de critérios de otimização sociais, como o índice de desenvolvimento humano, o potencial de geração de renda e emprego, aceitação da tecnologia, entre outros. Como estes indicadores são difíceis de quantificar, devem ser considerados no projeto de sistemas de eletrificação em locais isolados, onde o acesso a energia elétrica constitui um vetor de crescimento econômico e de melhora da qualidade de vida.
- Validação do modelo de simulação do SGHE a partir de dados experimentais derivados de um sistema real em operação.
- Implementação do algoritmo numa linguagem de programação de baixo nível com o intuito de diminuir os tempos de simulação.
- Fazer uma análise termoeconômica do SHGE para incorporar como variáveis de otimização as irreversibilidades e rendimentos energéticos dos componentes do sistema.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, H. **Global Optimization - Methods and Codes**. Disponível em: <[http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/member/student/hedar/Hedar\\_files/go.htm](http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/member/student/hedar/Hedar_files/go.htm)>. Acesso em: 12 set. 2015.
- ABOUZAHAR, I.; RAMAKUMAR, R. Loss of power supply probability of stand-alone photovoltaic systems: a closed form solution approach. **Energy Conversion, IEEE ...**, v. 6, n. 1, 1991.
- ABUL'WAFI, A. R. Optimization of economic/emission load dispatch for hybrid generating systems using controlled Elitist NSGA-II. **Electric Power Systems Research**, v. 105, p. 142–151, 2013.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: A definition. **Electric Power Systems Research**, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001.
- AGAJELU, B. O. et al. Life Cycle Cost Analysis of a Diesel/Photovoltaic Hybrid Power Generating System. **Industrial Engineering Letters**, v. 3, n. 1, p. 19–31, 2013.
- AI, B. et al. Computer-aided design of PV/wind hybrid system. **Renewable Energy**, v. 28, n. 10, p. 1491–1512, ago. 2003.
- AKACHUKWU, C. M. et al. **A Decade Survey of Engineering Applications of Genetic Algorithm in Power System Optimization** 2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. **Anais...**2014
- ALSEMA, E. A. **Environmental life cycle assessment of solar home systems**. Utrecht, The Netherlands: [s.n.].
- AL-SHAMMA'A, A. A.; KHALED, E. A. Techno-economic optimization of hybrid power system using genetic algorithm. **International journal of energy research**, v. 38, n. April 2014, p. 1608–1623, 2014.
- ANEEL - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Indicadores de continuidade, Amazonas Distribuidora de Energia S.A.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/srd/indqual/default.cfm>>. Acesso em: 10 maio. 2016.
- APRIL, J. et al. **Practical introduction to simulation optimization** Simulation Conference, 2003. Proceedings of the 2003 Winter. **Anais...**2003
- APRILIA, E. C. et al. Modeling the frequency response of photovoltaic inverters. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe**, p. 4–8, 2012.
- ARUN, S.; KUMARAVEL, S.; SELVAN, M. **Unit Size Optimization of Hybrid Energy System** 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies. **Anais...**IEEE, 2014
- ASHOK, S. Optimised model for community-based hybrid energy system. **Renewable Energy**, v. 32, n. 7, p. 1155–1164, jun. 2007.
- BÄCK, T. **Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms**. 1st. ed. New York: Oxford University Press, 1996.
- BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. **Evolutionary Computation 2: Advanced Algorithms and Operators**. 1st. ed. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000a.

BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. **Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators**. 1st. ed. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000b.

BÄCK, T.; SCHWEFEL, H. P. **Evolutionary Algorithms: Some Very Old Strategies for Optimization and Adaptation**New Computing Techniques in Physics Research (II) - Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Software Engineering, Artificial Intelligence and Expert Systems for High Energy and Nuclear Physics. *Anais...*La Londe-Les-Maures: Singapore: World Scientific, 1992

BAKER, J. E. **Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm**Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic Algorithms and Their Application. *Anais...*Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc., 1987

BANSAL, R. .; BHATTI, T. .; KOTHARI, D. . On some of the design aspects of wind energy conversion systems. **Energy Conversion and Management**, v. 43, p. 2175–2187, 2002.

BARLEY, C. D. et al. **Optimal Control of Remote Hybrid Power Systems Part 1: Simplified Model**Windpower. *Anais...*Washington, DC: 1995

BARLEY, C. D.; WINN, C. B. Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems. **Solar Energy**, v. 58, n. 4-6, p. 165–179, out. 1996.

BASHIR, M.; SADEH, J. **Optimal sizing of hybrid wind/photovoltaic/battery considering the uncertainty of wind and photovoltaic power using Monte Carlo**11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). *Anais...*Venice: IEEE, 2012a

BASHIR, M.; SADEH, J. **Size optimization of new hybrid stand-alone renewable energy system considering a reliability index**International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). *Anais...*Venice: 2012b

BASTOS, E. A. **Otimização de seções retangulares de concreto armado à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos**. [s.l.] Universidade Federal de Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2004.

BECHIKH, S.; SAID, L. BEN; GHÉDIRA, K. Searching for knee regions of the Pareto front using mobile reference points. **Soft Computing**, v. 15, n. 9, p. 1807–1823, 2011.

BENGHANEM, M. Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. **Applied Energy**, v. 88, n. 4, p. 1427–1433, 2011.

BERNAL-AGUSTÍN, J. L.; DUFO-LÓPEZ, R. Multi-objective design and control of hybrid systems minimizing costs and unmet load. **Electric Power Systems Research**, v. 79, n. 1, p. 170–180, jan. 2009.

BERNAL-AGUSTÍN, J. L.; DUFO-LÓPEZ, R.; RIVAS-ASCASO, D. M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. **Renewable Energy**, v. 31, n. 14, p. 2227–2244, nov. 2006.

BHANDARI, B. et al. Mathematical modeling of hybrid renewable energy system: A review on small hydro-solar-wind power generation. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 1, n. 2, p. 157–173, 2014.

BILIL, H.; ANIBA, G.; MAAROUFI, M. Multiobjective optimization of renewable energy penetration rate in power systems. **Energy Procedia**, v. 50, p. 368–375, 2014.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. A. **Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques**. 2nd. ed. New York: Springer Science+Business Media, Inc., 1992.

BILLINTON, R.; LI, W. **Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods**. New York: Springer Science+Business Media, Inc., 1994.

BINDNER, H. et al. **Lifetime modelling of lead acid batteries**. Roskilde (Denmark): Risø National Laboratory, 2005. Disponível em: <[http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:88309/datastreams/file\\_7710966/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:88309/datastreams/file_7710966/content)>. Acesso em: 24 nov. 2014.

BLASCO FERRAGUD, F. X. **Control predictivo basado en modelos mediante técnicas de optimización heurística. Aplicación a procesos no lineales y multivariados**. [s.l.] Universidad Politécnica de Valencia, 2012.

BLASQUES MACEDO, L. C. **Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2005.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. **ACM Computing Surveys**, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.

BONDESSON, A. **Comparative LCA model on renewable power solutions for off-grid radio base stations**. [s.l.] Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2010.

BOROWY, B. S.; SALAMEH, Z. M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 11, n. 2, p. 367–375, jun. 1996.

BOUROUNI, K.; BEN M'BAREK, T.; AL TAEI, A. Design and optimization of desalination reverse osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithms. **Renewable Energy**, v. 36, n. 3, p. 936–950, mar. 2011.

BRAGA, L. B. **Aspectos Técnicos, Econômicos e Ecológicos de Processos de Produção de Hidrogênio**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2014.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. 2 ed ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

CAGNINA, L. C.; ESQUIVEL, S. C.; COELLO COELLO, C. A. Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer. **Informatica**, v. 32, n. 3, p. 319–326, 2008.

CANEDO MONTESANO MIRANDA, A. B. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2014.

CAO, Y. J.; WU, Q. H. Teaching Genetic Algorithms Using Matlab. **International of Engineering Education**, v. 36, p. 139–153, 1999.

CARTAXO FERREIRA, E. **Fornecimento de Serviço de Energia Elétrica Para Localidades Isoladas da Amazônia: reflexões a partir de um estudo de caso**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2000.

CARUANA, R. A; ESHELMANN, L.; SCHAFFER, J. Representation and Hidden Bias II: Eliminating Defining Length Bias in Genetic Search Via Shuffle Crossover. **Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial intelligence**, p. 750–755, 1989.

CASSULA, A. M. et al. **Avaliação Probabilística do Desempenho de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Atendendo Comunidades Isoladas** XXII SNPTTE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. **Anais...** Brasília - DF: 2013

CELIK, A. N. The system performance of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy

systems using synthetically generated weather data. **Renewable Energy**, v. 27, n. 1, p. 107–121, set. 2002a.

CELIK, A. N. Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 18, p. 2453–2468, dez. 2002b.

CENTENO GONZALEZ, F. O. et al. Prediction by mathematical modeling of the behavior of an internal combustion engine to be fed with gas from biomass, in comparison to the same engine fueled with gasoline or methane. **Renewable Energy**, v. 60, p. 427–432, 2013.

CHAPMAN, R. N. **Sizing Handbook for Stand-Alone Photovoltaic/Storage Systems** Sandia Report. Albuquerque: [s.n.].

CHAUHAN, A.; SAINI, R. P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 99–120, 2014.

CHEDID, R.; KARAKI, S.; RIFAI, A. A multi-objective design methodology for hybrid renewable energy systems. **2005 IEEE Russia Power Tech**, 2005.

CHEDID, R.; SALIBA, Y. Optimization and control of autonomous renewable energy systems. **International journal of energy research**, v. 20, n. October 1994, p. 609–624, 1996.

CHEN, H. C. Optimum capacity determination of stand-alone hybrid generation system considering cost and reliability. **Applied Energy**, v. 103, p. 155–164, 2013.

CHIPPERFIELD, A. J.; FLEMING, P. J.; FONSECA, C. M. **Genetic algorithm tools for control systems engineering** 1st International Conference Adaptive Computing in Engineering Design and Control. **Anais...Plymouth, UK: 1994**

CLARKE, D. P.; AL-ABDELI, Y. M.; KOTHAPALLI, G. Multi-objective optimisation of renewable hybrid energy systems with desalination. **Energy**, v. 88, p. 457–468, 2015.

COELLO COELLO, C. A. **A Survey of Constraint Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms** Laboratorio Nacional de Informática Avanzada, , 1999. Disponível em: <<http://web.ist.utl.pt/adriano.simoes/tese/referencias/PapersAntonio/GAConstraints.pdf>>

COELLO COELLO, C. A.; MONTES, E. M. Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection (draft). **Advanced Engineering Informatics**, v. 16, n. 3, p. 193–203, 2002a.

COELLO COELLO, C. A.; MONTES, E. M. Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection. **Advanced Engineering Informatics**, v. 16, n. 3, p. 193–203, 2002b.

COLLETTE, Y.; SIARRY, P. **Multiobjective optimization: principles and case studies**. 1. ed. [s.l.] Springer, 2003.

COTRIM, A. M. B. **Instalações Elétricas**. 4 ed ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 1 mar. 2016a.

CRESESB. **Potencial Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico)>. Acesso em: 28 fev. 2016b.

- DE JONG, K. A. **An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptative Systems**. [s.l.] University of Michigan, 1975.
- DE SOTO, W.; KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. **Solar Energy**, v. 80, n. 1, p. 78–88, jan. 2006.
- DEB, K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 186, n. 2-4, p. 311–338, 2000.
- DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.
- DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- DEB, K. et al. Scalable test problems for evolutionary multiobjective optimization. **Evolutionary Multiobjective**, n. 1990, p. 1–27, 2005.
- DEB, K. Multi-objective Optimization. In: BURKE, E. K.; KENDALL, G. (Eds.). **Search Methodologies Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques**. 2. ed. New York: Springer, 2014. p. 403–450.
- DEEP, K. et al. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 212, n. 2, p. 505–518, 2009.
- DEMAIN, C.; JOURNÉE, M.; BERTRAND, C. Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces. **Renewable Energy**, v. 50, p. 710–721, 2013.
- DIAF, S. et al. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. **Energy Policy**, v. 35, n. 11, p. 5708–5718, nov. 2007.
- DIAF, S. et al. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. **Applied Energy**, v. 85, n. 10, p. 968–987, out. 2008.
- DIAS, E. V. **Variação Interanual dos Ventos do Nordeste**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras (MG), 2013.
- DILETTOSO, E. et al. Optimization of Hybrid Solar Wind Power Systems. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, v. 26, p. 225–231, 2007.
- DIORIO, N. et al. **System Advisor Model: Battery Storage & Dispatch Model Overview and Validation**, 2015.
- DJAMILA, M.; ERNEST, R. Modeling of Solar Irradiance and Cells. In: **Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control**. London, UK: Springer-Verlag London Limited, 2012. p. 31–87.
- DOBOS, A. P. **PVWatts Version 5 Manual (NREL/TP-6A20-62641)**. Denver, 2014: [s.n.].
- DRIESSE, A.; JAIN, P.; HARRISON, S. Beyond the curves: Modeling the electrical efficiency of photovoltaic inverters. **Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, n. August, 2008.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering for Thermal Processes**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2013.
- DUFO-LÓPEZ, R. et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage. **Applied Energy**, v. 88, n. 11, p. 4033–4041, nov. 2011.

- DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms. **Solar Energy**, v. 79, n. 1, p. 33–46, jul. 2005.
- DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems. **Renewable Energy**, v. 33, n. 12, p. 2559–2572, dez. 2008.
- DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. **HOGA - Hybrid-Renewable Optimization by Genetic Algorithms**. Disponível em: <<http://hoga-renewable.es.tl/>>. Acesso em: 19 maio. 2015.
- DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L.; CONTRERAS, J. Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage. **Renewable Energy**, v. 32, n. 7, p. 1102–1126, jun. 2007.
- DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L.; MENDOZA, F. Design and economical analysis of hybrid PV–wind systems connected to the grid for the intermittent production of hydrogen. **Energy Policy**, v. 37, n. 8, p. 3082–3095, ago. 2009.
- ECKERT, P.; RAKOWSKI, S. Pollutant Formation. In: MERKER, G. P.; SCHWARZ, C.; RÜDIGER, T. (Eds.). **Combustion Engines Development: Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation**. 1. ed. Wiesbaden, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. p. 659.
- EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**. 1st. ed. Berlin: Springer, 2003.
- EKREN, O.; EKREN, B. Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. **Applied Energy**, v. 85, n. 11, p. 1086–1101, 2008.
- EKREN, O.; EKREN, B. Y. Size Optimization of a Solar-wind Hybrid Energy System Using Two Simulation Based Optimization Techniques. **Fundamentals and Advanced Topics in Wind Power**, 2011.
- ELECTRICITY MARKET AND POLICY GROUP (BERKELY LAB). **Photovoltaic System Pricing Trends: Historical, Recent, and Near-Term Projections**. Disponível em: <<http://emp.lbl.gov/publications/photovoltaic-system-pricing-trendshistorical-recent-and-near-term-projections-2013-edi>>. Acesso em: 10 abr. 2015.
- ELEKTROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Eletrobras - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.** Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS293E16C4PTBRIE.htm>>. Acesso em: 27 ago. 2014.
- ENGIN, M. Sizing and simulation of PV-wind hybrid power system. **International Journal of Photoenergy**, v. 2013, 2013.
- ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation. **Solar Energy**, v. 28, n. 4, p. 293, 1982.
- ESHELMAN, L. J.; SCHAFFER, J. D. Real-coded genetic algorithms and interval-schemata. n. JANUARY 1992, p. 187–202, 1993.
- EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1082–1088, 2009.
- EVANS, D. L. Simplified method for predicting photovoltaic array output. **Solar Energy**, v.

27, n. 6, p. 555–560, jan. 1981.

FLECK, B.; HUOT, M. Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2688–2696, 2009.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. **Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization** ICGA. Anais...San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993

FOSTER, R.; GHASSEMI, M.; COTA, A. **Solar energy: renewable energy and the environment**. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. **Photovoltaic Report**. Disponível em: <<http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/photovoltaics-report-slides.pdf>>. Acesso em: 11 maio. 2015.

FTHENAKIS, V.; ALSEMA, E. Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004–early 2005 status. **Prog. Photovolt: Res. Appl.**, n. 14, p. 275–280, 2006.

FTHENAKIS, V.; KIM, H.; FRISCHKNECHT, R. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. **International Energy Agency**, p. 63, 2011.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C. Photovoltaics: Life-cycle analyses. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1609–1628, 2011.

FU, M. C. Feature Article: Optimization for simulation: Theory vs. Practice. **INFORMS Journal on Computing**, v. 14, n. 3, p. 192–215, 2002.

FU, Z.; YANG, J.; ZOU, T. Optimal Sizing Design for Hybrid Renewable Energy Systems in Rural Areas. In: **Computer and Computing Technologies in Agriculture IV**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 131–138.

GARCÍA-VALVERDE, R. et al. Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system. **Solar Energy**, v. 83, n. 9, p. 1434–1445, 2009.

GENG, D. **Simulation-based Optimization**. [s.l.] University of Wisconsin, Madison, 1996.

GERGAUD, O.; MULTON, B.; BEN AHMED, H. Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models. **7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal**, n. august, p. 1–7, 2002.

GIANNAKOUDIS, G. et al. Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 3, p. 872–891, 2010.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Crawfordsville, Indiana: Addison Wesley Longman, Inc., 1989.

GOLDBERG, D. E.; DEB, K. **A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms** (G. J. E. Rawlins, Ed.) Foundations of Genetic Algorithms. Anais...Morgan Kaufmann, 1991

GONÇALVES MACHADO, K. **Otimização de Estoque de Transformadores em Sistemas de Potência via Simulação Monte Carlo Cronológica e Técnicas Metaheurísticas**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2014.

GOSAVI, A. **Simulation Based Optimization - Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning**. 2nd. ed. New York: Springer, 2015.

- GRAHAM, V. A.; HOLLANDS, K. G. T. A method to generate synthetic hourly solar radiation globally. **Solar Energy**, v. 44, n. 6, p. 333–341, 1990.
- GRAHAM, V. A.; HOLLANDS, K. G. T.; UNNY, T. E. A time series model for  $K_t$  with application to global synthetic weather generation. **Solar Energy**, v. 40, n. 2, p. 83–92, 1988.
- GSÄNGER, S.; PITTELOUD, J.-D. **2015 Small Wind World Report Summary**. Bonn, Germany. World Wind Energy Association (WWEA), , 2015.
- GUPTA, A.; SAINI, R. P.; SHARMA, M. P. **Computerized modelling of hybrid energy system - Part III: Case study with simulation results** Proceedings of ICECE 2008 - 5th International Conference on Electrical and Computer Engineering. **Anais...** Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2008a
- GUPTA, A.; SAINI, R. P.; SHARMA, M. P. **Computerized Modelling of Hybrid Energy System — Part I: Case Study with Simulation Results** 5th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2008. **Anais...** Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2008b
- GUPTA, A.; SAINI, R. P.; SHARMA, M. P. **Modelling of hybrid energy system-Part II: Combined dispatch strategies and solution algorithm** 5th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2008. **Anais...** Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2008c
- GUPTA, R. A.; KUMAR, R.; BANSAL, A. K. Economic analysis and design of stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using Genetic algorithm. **International Conference on Computing, Communication and Applications (ICCCA)**, p. 1–6, 2012.
- HABIB, M. A. et al. Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system. **Energy**, v. 24, n. 11, p. 919–929, nov. 1999.
- HAINES, A. L.; MILLS, K. L.; FILLIBEN, J. J. Determining Relative Importance and Best Settings for Genetic Algorithm Control Parameters. **Evolutionary computation**, p. 1–34, 2014.
- HAKIMI, S. M.; MOGHADDAS-TAFRESHI, S. M. Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran. **Renewable Energy**, v. 34, n. 7, p. 1855–1862, jul. 2009.
- HAUSCHILD, L. **Avaliação de Estratégias de Operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.
- HELTON, J. C.; DAVIS, F. J. **Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis (SAND99-2240)**. Sandia National Laboratories. Albuquerque, USA. 2000: [s.n.].
- HERRERA, F.; LOZANO, M.; VERDEGAY, J. L. Trackling Real-Coded Genetic ALgoirhtms: Operators and Tools for Behavioural Analysis. **Artificial Intelligence Review**, v. 12, p. 265–319, 1998.
- HERTWICH, E. G. et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 20, p. 6277–6282, 2014.
- HOCAOĞLU, F. O.; GEREK, Ö. N.; KURBAN, M. A novel hybrid (wind–photovoltaic) system sizing procedure. **Solar Energy**, v. 83, n. 11, p. 2019–2028, nov. 2009.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**. 2nd. ed. Ann Harbor, Michigan: The MIT Press, 1992.

HOLLANDS, K. G. T. A Concentrator for Thin-Film Solar Cells. **Solar Energy**, v. 13, n. 149, 1971.

HOLLANDS, K. G. T.; D'ANDREA, L. J.; MORRISON, I. D. Effect of random fluctuations in ambient air temperature on solar system performance. **Solar Energy**, v. 42, n. 4, p. 335–338, 1989.

HOMER ENERGY LLC. BOULDER COLORADO. **Generating Synthetic Wind Data**, 2010a.

HOMER ENERGY LLC. BOULDER COLORADO. **Diesel O&M costs**. Disponível em: <<http://support.homerenergy.com/index.php?Knowledgebase/Article/View/107/25/10066---diesel-om-costs>>. Acesso em: 10 jun. 2016b.

HOMER ENERGY LLC. BOULDER COLORADO. **Hybrid Optimization Model for Electric Renewables**. Disponível em: <<http://homerenergy.com/>>. Acesso em: 25 maio. 2015.

HORN, J.; NAFPLIOTIS, N.; GOLDBERG, D. E. **A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization** Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on. **Anais...**1994

HORST, R.; PARDALOS, P. M.; NGUYEN, V. T. **Introduction to Global Optimization**. 2. ed. Dordrecht (The Netherlands): Springer US, 2000.

HOUCK, C. R. et al. A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation. **NCSU-IE TR**, n. 919, p. 14, 1995.

HRČKA, L.; VAŽAN, P.; ŠUTOVÁ, Z. Basic Overview of Simulation Optimization. **Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology**, v. 22, n. 341, p. 11–16, 2014.

IEA. **Technology Roadmap - Wind Energy**. International Energy Agency (IEA), , 2013a.

IEA. **Technology Roadmap - Solar Fotovoltaic**. International Energy Agency (IEA), , 2013b.

IERAPETRITOU, M. G.; ACEVEDO, J.; PISTIKOPOULOS, E. N. An optimization approach for process engineering problems under uncertainty. **Computers & Chemical Engineering**, v. 20, n. 6-7, p. 703–709, 1996.

IMAZON. **Amazônia legal**. Disponível em: <<http://imazon.org.br/mapas/>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

INMET. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canada: Academic Press, 1983.

IRENA. **Solar Photovoltaics. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series**. International Renewable Energy Agency (IRENA), , 2012.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2014**. International Renewable Energy Agency (IRENA), , 2015.

ISMAIL, M. S.; MOGHAVVEMI, M.; MAHLIA, T. M. I. Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 120–130, 2014.

JAHANBANI, F.; RIAHY, G. H. Optimum Design of a Hybrid Renewable Energy System.

**Renewable Energy - Trends and Applications**, p. 21, 2011.

JAIN, B. J.; POHLHEIM, H.; WEGENER, J. **On Termination Criteria of Evolutionary Algorithms** Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO 2001. **Anais...**2001

JAKHRANI, A. Q. et al. Selection of models for calculation of incident solar radiation on tilted surfaces. **World Applied Sciences Journal**, v. 22, n. 9, p. 1334–1343, 2013.

JAMIL, M.; KIRMANI, S.; RIZWAN, M. Techno-Economic Feasibility Analysis of Solar Photovoltaic Power Generation : A Review. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 2012, n. November, p. 266–274, 2012.

JENSEN, P. A. **Factor Formulas**. Disponível em: <<http://www.me.utexas.edu/~me353/index.html>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

JOINES, J. A.; KING, R. E.; CULBRETH, C. T. Cell Formation Using Genetic Algorithms. In: **Group Technology and Cellular Manufacturing: A State-Of-The-Art Synthesis of Research and Practice**. New York: Springer, 2012. p. 185–204.

JONES, A. D.; UNDERWOOD, C. P. A modelling method for building-integrated photovoltaic power supply. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 23, n. 3, p. 167–177, 1 ago. 2002.

JONGERDEN, M. R.; HAVERKORT, B. R. **Battery Modeling**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://purl.utwente.nl/publications/64556>>.

JONGERDEN, M. R.; HAVERKORT, B. R. Which battery model to use? **IET Software**, v. 3, n. 6, p. 445, 2009.

JUSTESEN, P. D. **Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms**. [s.l.] University of Aarhus, 2009.

KAABECHE, A.; IBTIOUEN, R. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system. **Solar Energy**, v. 103, p. 171–182, 2014.

KALDELLIS, J. K. **Stand-alone and Hybrid Wind Energy Systems. Technology, energy storage and applications**. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

KALDELLIS, J. K.; KONDILI, E.; FILIOS, A. Sizing a hybrid wind-diesel stand-alone system on the basis of minimum long-term electricity production cost. **Applied Energy**, v. 83, n. 12, p. 1384–1403, 2006.

KALDELLIS, J. K.; ZAFIRAKIS, D.; KONDILI, E. Optimum autonomous stand-alone photovoltaic system design on the basis of energy pay-back analysis. **Energy**, v. 34, n. 9, p. 1187–1198, set. 2009.

KALOGIROU, S. **Solar Energy Engineering: process and systems**. 1st. ed. London, UK: Elsevier Inc., 2009.

KAMJOO, A. et al. Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 74, p. 187–194, 2015.

KARAKI, S. H.; CHEDID, R. B.; RAMADAN, R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 14, n. 3, p. 766–772, 1999.

KARKI, R. et al. A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation.

**IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 2, p. 533–540, 2006.

KARKI, R.; BILLINTON, R. Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems. **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, v. 16, n. 4, p. 368–373, 2001.

KARKI, R.; DHUNGANA, D.; BILLINTON, R. An Appropriate Wind Model for Wind Integrated Power Systems Reliability Evaluation Considering Wind Speed Correlations. **Applied Sciences**, v. 3, p. 107–121, 2013.

KARLIS, A. D.; PAPADOPOULOS, D. P. **Modelling, Testing and Economic Analysis of a Small-Scale Hybrid Wind-Photovoltaic-Battery System Installation** International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ). **Anais...**Vigo: 2013

KATSIGIANNIS, Y. A. et al. **Evaluating the Performance of Small Autonomous Power Systems using Reliability Worth Analysis** Proceedings of PMAPS 2012. **Anais...**Istanbul, Turkey: 2012

KATSIGIANNIS, Y. A.; GEORGILAKIS, P. S.; KARAPIDAKIS, E. S. Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables. **IET Renewable Power Generation**, v. 4, n. 5, p. 404, 2010a.

KATSIGIANNIS, Y. A.; GEORGILAKIS, P. S.; KARAPIDAKIS, E. S. Genetic Algorithm Solution to Optimal Sizing Problem of Small Autonomous Hybrid Power Systems. **Artificial Intelligence: Theories, Models and Applications, Proceedings**, v. 6040, p. 327–332, 2010b.

KELLOGG, W. D. et al. Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 13, n. 1, p. 70–75, 1998.

KEMMOKU, Y. et al. Life cycle CO<sub>2</sub> emissions of a photovoltaic/wind/diesel generating system. **Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)**, v. 138, n. 2, p. 14–23, 2002.

KHADER, S.; ABU-AISHEH, A. MPPT for Hybrid Energy System Using Gradient Approximation and Matlab Simulink Approach. **Journal of Energy and Power ...**, v. 4, n. 3, 2010.

KHATOD, D. K.; PANT, V.; SHARMA, J. Analytical Approach for Well-Being Assessment of Small Autonomous Power Systems With Solar and Wind Energy Sources. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 25, n. 2, p. 535–545, jun. 2010.

KING, D. L. et al. Performance Model for Grid-Connected Photovoltaic Inverters, SAND2007-5036. **Contract**, v. 38, n. September, p. 655–660, 2007.

KING, D. L.; BOYSON, W. E.; KRATOCHVILL, J. A. Photovoltaic Array Performance Model. n. December, p. 1–43, 2004.

KLISE, G. T.; STEIN, J. S. **Models Used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems** Report SAND2009-8258, Albuquerque NM, USA. Albuquerque, 2009: [s.n.]. Disponível em: [https://smartgrid.gov/sites/default/files/doc/files/Models\\_Used\\_to\\_Assess\\_Performance\\_Photovoltaic\\_Systems\\_200907.pdf](https://smartgrid.gov/sites/default/files/doc/files/Models_Used_to_Assess_Performance_Photovoltaic_Systems_200907.pdf). Acesso em: 24 set. 2014.

KO, M. et al. Multi-Objective Optimization Design for a Hybrid Energy System Using the Genetic Algorithm. **Energies**, v. 8, n. 4, p. 2924–2949, 2015.

KONDILI, E. Design and performance optimisation of stand-alone and hybrid wind energy

systems. In: KALDELLIS, J. K. (Ed.). . **Stand-alone and Hybrid Wind Energy Systems. Technology, energy storage and applications**. 1. ed. Oxford: CRC Press, 2013. p. 81–101.

KORONAKIS, P. S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. **Solar Energy**, v. 36, n. 3, p. 217–225, 1986.

KOUTROULIS, E. et al. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. **Solar Energy**, v. 80, n. 9, p. 1072–1088, set. 2006.

KRAUTER, S.; RÜTHER, R. Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy. **Renewable Energy**, v. 29, n. 3, p. 345–355, 2004.

LAGORSE, J.; PAIRE, D.; MIRAOU, A. Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery. **Renewable Energy**, v. 34, n. 3, p. 683–691, mar. 2009.

LAMBERT, T.; GILMAN, P.; LILIENTHAL, P. Micropower System Modeling with Homer. In: **Integration of Alternative Sources of Energy**. [s.l.] John Wiley & Sons Inc, 2006. p. 379–418.

LEE, G. R.; FREARSON, L.; RODDEN, P. **An assessment of photovoltaic modelling software using real world performance data** 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. **Anais...** 2011

LEITE, A. M.; SCHMITT, W. F.; CASSULA, A. M. Analytical and Monte Carlo Approaches to Evaluate Probability Distributions of Interruption Duration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1341–1348, 2005.

LENZEN, M.; WACHSMANN, U. Wind turbines in Brazil and Germany: An example of geographical variability in life-cycle assessment. **Applied Energy**, v. 77, n. 2, p. 119–130, 2004.

LI, J.; WEI, W.; XIANG, J. A simple sizing algorithm for stand-alone PV/Wind/Battery hybrid microgrids. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 5307–5323, 2012.

LILIENTHAL, P.; LAMBERT, T.; GILMAN, P. Computer modeling of renewable power systems. In: **Encyclopedia of Energy**. 1st. ed. New York: Elsevier Ltd, 2004. v. 1p. 633–647.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors: With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada. **Solar Energy**, v. 7, n. 2, 1963.

LU, X.; MCELROY, M. B.; KIVILUOMA, J. Global potential for wind-generated electricity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, n. 27, p. 10933–8, 2009.

LUJANO-ROJAS, J. M.; DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems. **Energy**, v. 63, p. 19–27, dez. 2013.

LUNA-RUBIO, R. et al. Optimal sizing of renewable hybrids energy systems : A review of methodologies. **Solar Energy**, v. 86, n. 4, p. 1077–1088, abr. 2012.

LUSZCZEK, P. Enhancing Multicore System Performance Using Parallel Computing with MATLAB. **MATLAB Digest**, n. 1000, p. 1–4, 2008.

MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 304–315, 2014.

MACEDO, L. C. **Otimização de sistemas híbridos para a eletrificação de miniredes com fontes renováveis: aspectos de projeto, operação e gestão.** [s.l.] Universidade Federal de Pará (UFPA), 2014.

MACIEL SILVA, R. **Otimização Multiobjetivo na Análise da Integração de Geração Distribuída às Redes de Distribuição.** [s.l.] UNESP - Ilha Solteira, 2012.

MAHERI, A. Multi-objective design optimisation of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties. **Renewable Energy**, v. 66, p. 650–661, 2014.

MAKHLOUFI, S. Comparative study between classical methods and genetic algorithms for sizing remote PV systems. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 6, n. 3, p. 221–231, 2015.

MALEKI, A.; ASKARZADEH, A. Comparative study of artificial intelligence techniques for sizing of a hydrogen-based stand-alone photovoltaic/wind hybrid system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 19, p. 9973–9984, 2014.

MALEKI, A.; POURFAYAZ, F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. **Solar Energy**, v. 115, p. 471–483, 2015.

MALKAWI, A.; AUGENBROE, G. **Advance Building Simulation.** 1. ed. New York: Spon Press - Taylo & Francis Group, 2004.

MANWELL, J. F. Hybrid Energy Systems. In: CUTLER, J. C. (Ed.). . **Encyclopedia of Energy.** [s.l.] Elsevier Inc., 2004. v. 3p. 215–229.

MANWELL, J. F. et al. **Hybrid2 - A Hybrid System Simulation Model - Theory Manual.** Massachusetts, 2006: [s.n.].

MANWELL, J. F.; DENG, G.; MCGOWAN, J. G. **A Markov Process Based Performance Model for Wind/Diesel/Battery Storage Systems**European Wind Energy Conference'94. **Anais...**Thessaloniki, Greece: 1994

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. **Solar Energy**, v. 50, n. 5, p. 399–405, maio 1993.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G. A combined probabilistic/time series model for wind diesel systems simulation. **Solar Energy**, v. 53, n. 6, p. 481–490, dez. 1994.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind Characteristics and Resource. In: **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.** 2 ed ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2009a. p. 23–89.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind Energy System Economics. In: **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.** 2nd. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009b. p. 505–545.

MARION, B.; RUMMEL, S.; ANDERBERG, A. Current–voltage curve translation by bilinear interpolation. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 12, n. 8, p. 593–607, 2004.

MARKVART, T. Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 277–281, 1997.

MARKVART, T. **Solar Electricity.** 2nd. ed. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2000.

MARTINS, F. R. et al. **Mapeamento dos Recursos de Energia Solar no Brasil Utilizando Modelo de Transferência Radiativa Brasil-SRI** Congresso Brasileiro de Energia Solar (I

CBENS). **Anais...**Fortaleza, Brasil: 2007

MASOUM, M. A. S.; BADEJANI, S. M. M.; KALANTAR, M. Optimal placement of hybrid PV-wind systems using genetic algorithm. **2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)**, n. 1, p. 1–5, jan. 2010.

MATHWORKS. **Parallel Computing Toolbox™ User's Guide**. Natick: The MathWorks, Inc., 2016.

MCGOWAN, J. G. et al. Hybrid wind/PV/diesel hybrid power systems modeling and South American applications. **Renewable Energy**, v. 9, n. 1-4, p. 836–847, 1996.

MCGOWAN, J. G.; MANWELL, J. F. Hybrid wind/PV/diesel system experiences. **Renewable Energy**, v. 16, n. 1-4 -4 pt 2, p. 928–933, 1999.

MEHLERI, E. D. et al. Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays. **Renewable Energy**, v. 35, n. 11, p. 2468–2475, 2010.

MEREI, G.; BERGER, C.; SAUER, D. U. Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. **Solar Energy**, v. 97, p. 460–473, 2013.

MICHALEWICZ, Z. A Survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods. **Evolutionary Programming**, v. 4, n. Holland 1975, p. 135–155, 1995.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3. ed. New York: Springer, 1996.

MICHALEWICZ, Z.; JANIOW, C. Z. **Handling Constraints in Genetic Algorithms** Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms. **Anais...**1993

MICHALEWICZ, Z.; SCHOENAUER, M. Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems. **Evolutionary Computation**, v. 4, n. 1, p. 1–32, 1996.

MILTON, J. **Analysis and Improvement of Genetic Algorithms using Concepts from Information Theory**. [s.l.] University of Technology Sydney (UTS), 2009.

MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. 1st. ed. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1998.

MOHAMED, F. A.; KOIVO, H. N. Modelling and Environmental/Economic Power Dispatch of MicroGrid Using MultiObjective Genetic Algorithm Optimization. In: CARRIVEAU, R. (Ed.). **Fundamental and Advanced Topics in Wind Power**. [s.l.] InTech, 2011. p. 19.

MONDOL, J. D.; YOHANIS, Y. G.; NORTON, B. Optimising the economic viability of grid-connected photovoltaic systems. **Applied Energy**, v. 86, n. 7-8, p. 985–999, jul. 2009.

MOSTOFI, F.; SHAYEGHI, H. Feasibility and Optimal Reliable Design of Renewable Hybrid Energy System for Rural Electrification in Iran. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 2, n. 4, 2012.

MÜHLENBEIN, H. **The Breeder Genetic Algorithm: a provable optimal search algorithm and its application** Applications of Genetic Algorithms, IEE Colloquium on. **Anais...**mar. 1994

MÜHLENBEIN, H.; SCHLIERKAMP-VOOSEN, D. Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm I. Continuous Parameter Optimization. **Evolutionary Computation**, v. 1, n. 1, p. 25–49, 1993.

MÜHLENBEIN, H.; SCHLIERKAMP-VOOSEN, D. Analysis of Selection, Mutation and Recombination in Genetic Algorithms. **Evolution and Biocomputation, Computational Models of Evolution**, p. 142–168, 1995.

MUKUND, R. P. **Wind and Solar Power Systems. Design, Analysis and, Operation**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

MUNEER, T.; SALUJA, G. S. A brief review of models for computing solar radiation on inclined surfaces. **Energy Conversion and Management**, v. 25, n. 4, p. 443–458, 1985.

NASIRAGHDAM, H.; JADID, S. Optimal hybrid PV/WT/FC sizing and distribution system reconfiguration using multi-objective artificial bee colony (MOABC) algorithm. **Solar Energy**, v. 86, n. 10, p. 3057–3071, 2012.

NAWRI, N. et al. The Wind Energy Potential of Iceland. v. 16, p. 2014, 2014.

NEHRIR, M. H. An approach to evaluate the general performance of stand-alone wind/photovoltaic generating systems. **Energy Conversion, ...**, v. 15, n. 4, p. 433–439, 2000.

NELSON, D. B.; NEHRIR, M. H.; WANG, C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. **Renewable Energy**, v. 31, n. 10, p. 1641–1656, ago. 2006.

NEVES JÚNIOR, R. M. **Modelo Financeiro para Desenvolvimento de Negócios em Energia Renovável**. [s.l.] Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2010.

NIEZ, A. **Electrification Policies Comparative Study on Rural Electrification Policies in Emerging Economies**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.iea.org/papers/2010/rural\\_elect.pdf](http://www.iea.org/papers/2010/rural_elect.pdf)>.

NOTTON, G.; LAZAROV, V.; STOYANOV, L. Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations. **Renewable Energy**, v. 35, n. 2, p. 541–554, 2010.

NOTTON, G.; MUSELLI, M.; POGGI, P. Costing of a stand-alone photovoltaic system. **Energy**, v. 23, n. 4, p. 289–308, abr. 1998.

NREL. **Brazil Hourly DNI, GHI and Diffuse Solar Data**. Disponível em: <<http://en.openei.org/doe-opendata/dataset/brazil-hourly-dni-ghi-and-diffuse-solar-data>>. Acesso em: 1 fev. 2016.

OLIVEIRA BARBOSA, DE C. F. **Avaliação tecnológica, operacional e de gestão de sistemas híbridos para geração de eletricidade na região amazônica**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2006.

OLIVEIRA BARBOSA, DE C. F. C. F. et al. **Situação da Geração Elétrica Através de Sistemas Híbridos no Estado do Pará e Perspectivas Frente à Universalização da Energia Elétrica** Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural. Anais...Campinas: 2004Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200052&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200052&lng=en&nrm=abn)>

OLIVEIRA BARBOSA, DE C. F.; PINHO, J. T. **Experiência com Geração de Energia Elétrica Utilizando Sistemas Híbridos em Vilas Isoladas na Amazônia**XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Anais...Rio de Janeiro: 2007

OLIVEIRA BARBOSA, DE C. F.; PINHO, J. T. **Avaliação Econômica de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos-Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade na Amazônia**

Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. **Anais...**2008

PALIWAL, P.; PATIDAR, N. P.; NEMA, R. K. Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using Particle Swarm Optimization. **Renewable Energy**, v. 63, p. 194–204, 2014.

PARKINSON, A. R.; BALLING, R. J.; HEDENGREN, J. D. **Optimization Methods for Engineering Design - Applications and Theory**. 1st. ed. Brigham: Brigham Young University, 2013.

PATEL, M. R. **Wind and solar power systems**. Boca Raton: CRC Press, 1999.

PAUDEL, S. **Optimization of Hybrid PV/Wind Power System for Remote Telecom Station**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2011.

PEHNT, M. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. **Renewable Energy**, v. 31, n. 1, p. 55–71, 2006.

PELET, X.; FAVRAT, D.; LEYLAND, G. Multiobjective optimisation of integrated energy systems for remote communities considering economics and CO2 emissions. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 44, n. 12, p. 1180–1189, dez. 2005.

PENG, J.; LU, L.; YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 255–274, 2013.

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271–289, 1990.

PETRONE, G. et al. A probabilistic non-dominated sorting GA for optimization under uncertainty. **Engineering Computations**, v. 30, n. 8, p. 1054–1085, 2013.

PINHO, J. T. et al. **Manual de Implantação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel**. Belém, 2008: [s.n.].

PINHO, J. T. **Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

POHLHEIM, H. **Evolutionary Algorithms: Overview, Methods and Operators**. 1. ed. Berlin: GEATbx, 2006.

PROTOGEROPOULOS, C.; BRINKWORTH, B. J.; MARSHALL, R. H. Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage. **International Journal of Energy Research**, v. 21, p. 465–479, 1997.

RAADAL, H. L. et al. Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 7, p. 3417–3422, 2011.

RADCLIFFE, N. J. Equivalence Class Analysis of Genetic Algorithms. **Complex Systems**, v. 5, n. 2, p. 183–205, 1991.

REICHE, K.; COVARRUBIAS, A.; MARTINOT, E. Expanding Electricity Access to Remote Areas: Off-Grid Rural Electrification in Developing Countries. **World Power 2000**, p. 52–60, 2000.

REINDL, D. T. W.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Diffuse Fraction Correlations. **Solar Energy**, v. 45, n. 1, 1990.

REKLAITIS, G. V.; RAVINDRAN, A.; RAGSDELL, K. M. **Engineering Optimization Methods and Applications**. 1st. ed. New York: Wiley, 1983.

REN21. **Renewables 2015 Global Status Report**. [s.l.] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2015.

ROBERTS, J. J. **Análise de Desempenho de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Solar-Eólico-Diesel considerando variações probabilísticas da carga e dos recursos renováveis**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2012.

ROBERTS, J. J. et al. **Simulation and Validation of Photovoltaic System Performance Models** Book of Abstracts and Proceedings of 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2015. **Anais...**São José dos Campos, SP, Brasil: FDCT - Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2015

ROSS, M. M. D. **A Lead-Acid Battery Model for Hybrid System Modelling**. Montreal, Quebec, 2001: [s.n.].

ROSS, M. M. D. **A simple but comprehensive lead-acid battery model for hybrid system simulation** Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada. **Anais...**Calgary, Alberta, Canada: 2007

RYDH, C. J. Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. **Journal of Power Sources**, v. 80, n. 1, p. 21–29, 1999.

SAIF, A. et al. Multi-objective capacity planning of a PV-wind-diesel-battery hybrid power system. **2010 IEEE International Energy Conference**, p. 217–222, dez. 2010.

SANDIA NATIONAL LABRATORIES. **Stand Alone Photovoltaic System- A Handbook of Recommended Design Practices**. Springfield: [s.n.].

SARENI, B.; ROBOAM, X.; RE, J. System optimization by multiobjective genetic algorithms and analysis of the coupling between variables, constraints and objectives. **COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 24, n. 3, p. 805–820, 2005.

SARMADY, S. An Investigation on Genetic Algorithm Parameters. **School of Computer Science, Universiti Sains Malaysia**, 2007.

SCHAFFER, J. D. **Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms**. Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, Pittsburgh, PA, USA, July 1985. **Anais...**1985

SEELING-HOCHMUTH, G. **Optimisation of Hybrid Energy Systems Sizing and Operation Control**. [s.l: s.n.].

SEELING-HOCHMUTH, G. C. A combined optimisation concet for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems. **Solar energy**, v. 61, n. 2, p. 77–87, 1997.

SENJYU, T. et al. Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy. **Renewable Energy**, v. 32, n. 11, p. 1917–1933, set. 2007.

SHAHIRINIA, A. H.; TAFRESHI, S. M. M. **Optimal sizing of hybrid power system using genetic algorithm** International Conference on Future Power Systems. **Anais...**Amsterdam: 2005

SHARAFI, M.; ELMEKKAWY, T. Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable

energy systems using PSO-simulation based approach. **Renewable Energy**, v. 68, p. 67–69, ago. 2014.

SHERWANI, A. F.; USMANI, J. A.; VARUN. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 540–544, 2010.

SHI, J. et al. Robust design and optimization for autonomous PV-wind hybrid power systems. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, v. 9, n. 3, p. 401–409, 2008.

SHI, J.; ZHU, X.; CAO, G. Design and techno-economical optimization for stand-alone hybrid power systems with multi-objective evolutionary algorithms. **International Journal of Energy Research**, v. 31, n. August 2006, p. 315–328, 2007.

SHORT, W.; PACKKEY, D. J. **A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies**. Golden, Colorado, 1995: [s.n.].

SIDDIQUI, M. U.; ABIDO, M. Parameter estimation for five- and seven-parameter photovoltaic electrical models using evolutionary algorithms. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 12, p. 4608–4621, dez. 2013.

SILVA DE SOUSA, E. et al. **Variabilidade interanual da precipitação e da temperatura do ar em Teresina-PI no período de 1976 a 2010 visando a captação e armazenamento de águas pluviais**XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais...**Guarapari, ES, Brasil: 2011

SILVA, D.; NAKATA, T. Multi-objective assessment of rural electrification in remote areas with poverty considerations. **Energy Policy**, v. 37, n. 8, p. 3096–3108, ago. 2009.

SILVEIRA, J. L. et al. **Aspectos técnicos , econômicos e ecológicos da produção de hidrogênio renovável no contexto brasileiro**VIII Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica COLIM 2014. **Anais...**Cuenca - Ecuador: 2014

SIMON, D. **Evolutionary Optimization Algorithms**. 1st. ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2013.

SINGH, C. Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 24, n. 1, p. 163–172, mar. 2009.

SINHA, S.; CHANDEL, S. S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 192–205, 2014.

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction To Genetic Algorithms**. New York: Springer, 2007.

SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. **Evolutionary computation**, v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994.

SUMATHI, S.; HAMSAPRIYA, T.; SUREKHA, P. **Evolutionary Intelligence: An Introduction to Theory and Applications With Matlab**. 1. ed. Berlin: Springer, 2008.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. 1st. ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2009.

THE WORLD BANK. **World Development Indicators: Electricity production, sources, and access**. Disponível em: <<http://wdi.worldbank.org/table/3.7>>. Acesso em: 4 dez. 2015.

THIBAUD, S. M.; ROBERTS, J. J.; PRADO, P. O. **Proyecto de un Sistema Híbrido de Generación con Energías Renovables para un Establecimiento Rural Aislado**Book of

Abstracts and Proceedings of 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2015. **Anais...**São José dos Campos, SP, Brasil: FDCT - Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2015

TINA, G.; GAGLIANO, S. Probabilistic analysis of weather data for a hybrid solar/wind energy system. **International Journal of Energy Research**, n. March 2010, p. 221–232, 2011.

TINA, G.; GAGLIANO, S.; RAITI, S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. **Solar Energy**, v. 80, n. 5, p. 578–588, maio 2006.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 555–565, 2013.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors**. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/index.html>>. Acesso em: 10 set. 2015.

UPADHYAY, S.; SHARMA, M. P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 47–63, 2014.

URBINA, A. et al. **Probabilistic analysis of rechargeable batteries in a photovoltaic power supply system** 194th Electrochemical Society Meeting. **Anais...**Boston, MA: 1998

VARUN; BHAT, I. K.; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1067–1073, 2009.

VENKATARAMAN, P. **Applied Optimization With Matlab Programming**. 2nd. ed. New York: John Wiley Inc, 2002.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. **Power Electronics Conference, 2009 ...**, p. 1244–1254, set. 2009.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, maio 2009.

VÖSSNER, S. **Convergence Measures for Genetic Algorithms**. Stanford: [s.n.].

WALKER, G. Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. **Journal of Electrical and Electronics Engineering**, v. 21, n. 1, p. 49–55, 2001.

WANG, L.-F.; SHI, L.-Y. Simulation Optimization: A Review on Theory and Applications. **Acta Automatica Sinica**, v. 39, n. 11, p. 1957–1968, 2013.

WEISSER, D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. **Energy**, v. 32, n. 9, p. 1543–1559, 2007.

WHITLEY, D. **A Genetic Algorithm Tutorial** Fort Collins Computer Science Department, Colorado State University, , 1994. Disponível em: <<http://www.cs.colostate.edu/~genitor/MiscPubs/tutorial.pdf>>

WIES, R. W. et al. Economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote villages. **IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.**, p. 1–8, 2004.

WOODBANK COMMUNICATIONS LTD. **Battery and Energy Technologies**. Disponível em: <<http://www.mpoweruk.com/glossary.htm#float>>. Acesso em: 19 set. 2015.

XINJIE, Y.; MITSUO, G. **Introduction to Evolutionary Algorithms**. 1st. ed. London: Springer, 2010.

XU, D. et al. Optimal sizing of standalone hybrid wind/pv power systems using genetic algorithms. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005.**, n. May, p. 1722–1725, 2005.

YANG, H.; LU, L.; ZHOU, W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. **Solar Energy**, v. 81, n. 1, p. 76–84, jan. 2007.

YANG, H.; WEI, Z.; CHENGZHI, L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system. **Applied Energy**, v. 86, n. 2, p. 163–169, fev. 2009.

YANG, H. X.; LU, L.; BURNETT, J. Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong. **Renewable Energy**, v. 28, n. 11, p. 1813–1824, set. 2003.

YANG, X. S.; KOZIEL, S.; LEIFSSON, L. Computational optimization, modelling and simulation: Recent trends and challenges. **Procedia Computer Science**, v. 18, p. 855–860, 2013.

YANG, X. S.; KOZIEL, S.; LEIFSSON, L. Computational optimization, modelling and simulation: Past, present and future. **Procedia Computer Science**, v. 29, p. 754–758, 2014.

YANG, X.-S. **Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications**. 1st. ed. New Jersey: John Wiley Inc, 2010.

YATES, T.; HIBBERD, B. Production Modeling for Grid-Tied PV. **SolarPRO**, p. 30–56, 2010.

YAZDANPANA, M.-A. Modeling and sizing optimization of hybrid photovoltaic/wind power generation system. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 10, n. 1, p. 49, 2014.

ZENG, J. et al. **Operational Optimization of a Stand-alone Hybrid Renewable Energy Generation System based on an Improved Genetic Algorithm**Power and Energy Society General Meeting, IEEE. **Anais...**Minneapolis, MN: 2010

ZHANG, L.; BARAKAT, G.; YASSINE, A. Deterministic optimization and cost analysis of hybrid PV/wind/battery/diesel power system. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 2, n. 4, 2012.

ZHANG, X. et al. Components sizing of hybrid energy systems via the optimization of power dispatch simulations. **Energy**, v. 52, p. 165–172, 2013.

ZHOU, W. et al. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 380–389, fev. 2010.

ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; BLEULER, S. A tutorial on evolutionary multiobjective optimization. In: GANDIBLEUX, X. et al. (Eds.). **Metaheuristics for Multiobjective Optimisation - Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 3–37.