

# UMA ABORDAGEM EVOLUTIVA E HÍBRIDA PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

**Carolina Gil Marcelino**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eduardo Maciel de Almeida

Coorientadora: Prof. Dra. Elizabeth Fialho Wanner

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional  
Doutorado - CEFET MINAS

Junho, 2017

# Sumário

- 1 Introdução
  - Objetivos
  - Metodologia da Pesquisa
  - Revisão da Literatura
- 2 Algoritmos Evolucionários
- 3 Conclusão
  - Trabalhos Futuros

- **Algoritmos Evolucionários (AE)**

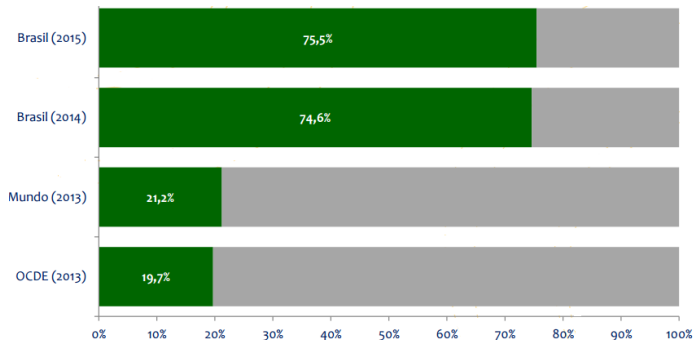
AE podem ser descritos como métodos, técnicas ou metaheurísticas que partem dos princípios observados na biologia, relativos a adaptação dos seres vivos ao meio. O embasamento presente em AE se atribui no fato dos mecanismos observados na natureza possuírem a capacidade de solucionar diversos problemas de alta complexidade, quando traduzidos em procedimentos computacionais [Gaspar-Cunha, Takahashi e Antunes 2013].

- **Fluxo de Potência Ótimo (OPF)**

OPF pode ser caracterizado como um mecanismo capaz de realizar os ajustes das variáveis de controle visando encontrar as condições ótimas para operação da rede de energia elétrica - despacho de potência ativa e reativa, redução na emissão de poluentes, minimização de custos operacionais, diminuição de perdas na transmissão, entre outros - [Abido 2002], [Biskas et al. 2005], [Frank, Steponavice e Rebennack 2012].

## Energia Elétrica no Brasil

- Em 2013, a participação de renováveis na Matriz Elétrica Brasileira caiu para 79,3% devido às condições hidrológicas desfavoráveis e ao aumento da geração térmica;



**% de renováveis na  
matriz elétrica  
brasileira:**

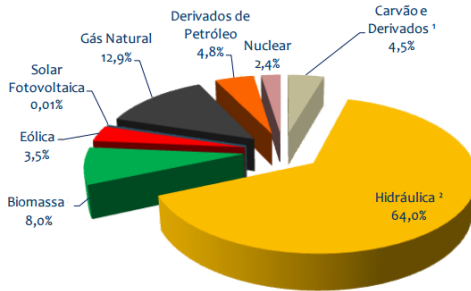
2013: 78,3%

2012: 84,5%

2011: 88,9%

- O Brasil começa a caminhar na corrida energética renovável de fontes eólica e solar;

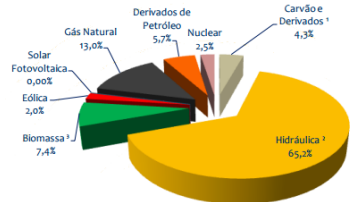
**BRASIL (2015)**



oferta hidráulica<sup>2</sup> em 2015: **394,2 TWh**

oferta total<sup>2</sup> em 2015: **615,9 TWh**

**BRASIL (2014)**



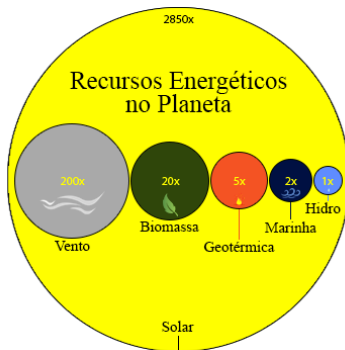
oferta hidráulica<sup>2</sup> em 2014: **407,2 TWh**

oferta total<sup>2</sup> em 2014: **624,3 TWh**

<sup>1</sup> Inclui gás de coqueria

<sup>2</sup> Inclui importação

- Fontes renováveis de energia (RES) podem ser descritas como aquelas que são obtidas via recursos naturais.



- RES possuem o potencial de fornecer 3078 vezes as atuais necessidades globais de energia;

## Objetivo Geral

*O objetivo geral deste trabalho é contribuir para a eficiência energética e o uso sustentável da energia elétrica no campo da otimização e pesquisa operacional, visando solucionar problemas específicos, os quais sejam: problemas Fluxo de Potência Ótimo no despacho elétrico em usinas hidrelétricas e eólicas, bem como no despacho elétrico em redes microgrid. Além disso proporcionar a otimização de problemas de Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança no despacho ativo/reactivo em redes larga escala.*



## Objetivos Específicos

- 1) *Desenvolver e validar um novo algoritmo evolucionário híbrido, que incorpore conceitos de teoria evolutiva, inteligência de enxames e programação matemática;*
- 2) *Propor e implementar um operador de busca local acoplado ao algoritmo que auxilie no processo de busca;*
- 3) *Aplicar o algoritmo na solução de problemas SCOPF em modelos de otimização no despacho reativo (ORPD) e ativo/reactivo (OARPD);*
- 4) *Propor e implementar melhorias em um modelo de despacho elétrico em usinas hidrelétricas;*
- 5) *Aprimorar um modelo de um sistema microgrid e otimizar seu funcionamento;*
- 6) *Realizar experimentos simulados e avaliar os resultados obtidos com emprego de técnicas de estatística inferencial, visando em alguns casos, comparar os resultados obtidos com os oriundos da literatura.*

## Planejamento e Análise de Experimentos

Técnica realizada para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento [Montgomery 2012].

O planejamento de experimentos adotado neste trabalho contempla:

- Curvas de convergência média;
- Gráficos Boxplot;
- Teste de Hipótese;
- T-test;
- ANOVA;
- Teste de comparações múltiplas;
- Metodologia de Superfície de Resposta.

## Revisão da Literatura

- A formulação clássica de OPF foi introduzida por [Carpertier 1962];

## Revisão da Literatura

- A formulação clássica de OPF foi introduzida por [Carpertier 1962];
- Nos anos recentes metaheurísticas clássicas e híbridas vem sendo utilizadas para o tratamento de OPF [Frank, Steponavice e Rebennack 2012];

## Revisão da Literatura

- A formulação clássica de OPF foi introduzida por [Carpertier 1962];
- Nos anos recentes metaheurísticas clássicas e híbridas vem sendo utilizadas para o tratamento de OPF [Frank, Steponavice e Rebennack 2012];
- Muitos trabalhos vem sendo realizados para solução de OPF em grandes redes **sem** considerar restrições de segurança;

## Revisão da Literatura

- A formulação clássica de OPF foi introduzida por [Carpertier 1962];
- Nos anos recentes metaheurísticas clássicas e híbridas vem sendo utilizadas para o tratamento de OPF [Frank, Steponavice e Rebennack 2012];
- Muitos trabalhos vem sendo realizados para solução de OPF em grandes redes **sem** considerar restrições de segurança;
- Segundo [Capitanescu 2016] a abordagem OPF clássica se torna obsoleta uma vez que não prevê contingências de segurança;

## Revisão da Literatura

- A formulação clássica de OPF foi introduzida por [Carpertier 1962];
- Nos anos recentes metaheurísticas clássicas e híbridas vem sendo utilizadas para o tratamento de OPF [Frank, Steponavice e Rebennack 2012];
- Muitos trabalhos vem sendo realizados para solução de OPF em grandes redes **sem** considerar restrições de segurança;
- Segundo [Capitanescu 2016] a abordagem OPF clássica se torna obsoleta uma vez que não prevê contingências de segurança;
- Os trabalhos de [Pham, Rueda e Erlich 2014] e [Niu et al. 2014] solucionaram os Sistemas IEEE de 41, 57, 118, 300 barras em modo SCOPF;

## Revisão da Literatura

- A formulação clássica de OPF foi introduzida por [Carpertier 1962];
- Nos anos recentes metaheurísticas clássicas e híbridas vem sendo utilizadas para o tratamento de OPF [Frank, Steponavice e Rebennack 2012];
- Muitos trabalhos vem sendo realizados para solução de OPF em grandes redes **sem** considerar restrições de segurança;
- Segundo [Capitanescu 2016] a abordagem OPF clássica se torna obsoleta uma vez que não prevê contingências de segurança;
- Os trabalhos de [Pham, Rueda e Erlich 2014] e [Niu et al. 2014] solucionaram os Sistemas IEEE de 41, 57, 118, 300 barras em modo SCOPF;
- O trabalho de [Pezzini, Gomis-Bellmunta e Sudrià -Andreua 2011] realizou um levantamento sobre metaheurísticas utilizadas para tratamento do despacho elétrico em UHE;



## Revisão da Literatura

- A formulação clássica de OPF foi introduzida por [Carpertier 1962];
- Nos anos recentes metaheurísticas clássicas e híbridas vem sendo utilizadas para o tratamento de OPF [Frank, Steponavice e Rebennack 2012];
- Muitos trabalhos vem sendo realizados para solução de OPF em grandes redes **sem** considerar restrições de segurança;
- Segundo [Capitanescu 2016] a abordagem OPF clássica se torna obsoleta uma vez que não prevê contingências de segurança;
- Os trabalhos de [Pham, Rueda e Erlich 2014] e [Niu et al. 2014] solucionaram os Sistemas IEEE de 41, 57, 118, 300 barras em modo SCOPF;
- O trabalho de [Pezzini, Gomis-Bellmunta e Sudrià -Andreua 2011] realizou um levantamento sobre metaheurísticas utilizadas para tratamento do despacho elétrico em UHE;
- A operação de *microgrids* na rede pública pode proporcionar benefícios importantes para o desempenho do sistema global, se gerenciado e coordenado de forma eficiente [Hatziargyriou 2014].

## Algoritmo de Evolução Diferencial (DE)

- Embora o DE seja classificado como um algoritmo evolucionário, e se enquadre em um esquema geral de AE, a mutação diferencial não tem base ou inspiração em nenhum processo natural (Guimarães, 2013).

---

### Algoritmo 1: *Pseudocódigo do algoritmo de DE. Adaptado: [Das e Suganthan 2011]*

---

início

Passo 1: Iniciar os parâmetros de controle de DE: taxa de perturbação  $F$ , taxa de recombinação  $Cr$ , tamanho da população  $NP$  informados pelo usuário. ;

Passo 2: Iniciar o contador de gerações  $t = 1$  e inicializar uma população aleatória de  $NP$  indivíduos  $X_t = \{x_{t,i}; i = 1, \dots, N\}$ ;

Passo 3;;

**enquanto** o critério de parada não é satisfeito **faça**

**para**  $i = 1:NP$  para cada indivíduo sequencialmente **hacer**

        Passo 3.1 Mutação ;

        Gerar vetor-diferença:  $V_{t,i} = x_{t,r1} + F(x_{t,r2} - x_{t,r3})$ ;  $r1, r2, r3 \in \{1, \dots, N\}$  ;

        Passo 3.2 Cruzamento ;

$u_{j,i,j} = v_{t,i,j}$ , IF  $(U_{[0,1]} \leq Cr \vee j = \delta_i)$  caso contrário  $x_{t,i,j}$  ;

        Passo 3.3 Seleção ;

        IF  $f(u_{t,i}) \leq f(x_{t,1})$  caso contrário  $x_{t+1,i} = u_{t,i}$ ;

        ELSE  $x_{t+1,i} = x_{t,i}$  ;

        END IF;

**fin**

$t = t + 1$

**fim**

**fin**

---

O objetivo geral de contribuir para eficiência energética e o uso sustentável da energia elétrica foi alcançado, considerando a relevância dos resultados obtidos. Os seguintes objetivos específicos foram também obtidos:





- Um novo algoritmo evolucionário híbrido foi desenvolvido e testado (C-DEEPSO);
- A concepção do novo operador de busca local *Spiral Local Search* (SLS);
- SLS acoplada a C-DEEPSO gerou uma versão híbrida competitiva na solução de problemas SCOPF em redes larga escala;
- Uma extensão ao modelo de despacho elétrico em UHE foi realizada, melhorando o resultado, contribuindo com o aumento de economia de água;
- Um modelo HMGS foi aperfeiçoado e com uso de MCDA foi possível classificar diferentes sistemas BESS.





Como trabalhos futuros, sugere-se dar continuidade nesta pesquisa nas seguintes direções:






- Realizar ajuste de parâmetros das taxas referentes ao operador SLS, bem como o tamanho da população utilizada em hC-DEEPSO, uma vez que este parâmetro é diretamente ligado à operação de busca local proposta;
- Propor e implementar um algoritmo multiobjetivo baseado em hC-DEEPSO, com inspiração no mecanismos de dominâncias presentes no NSGA-II ou SPEA2, uma vez que o algoritmo hC-DEEPSO já possui uma memória arquivada e;
- Aprimorar o modelo de HMGS incluindo a compensação de energia com a rede pública e a otimização para obtenção do tamanho adequado de BESS.

## Agradecimentos

- Deus;
- Família;
- Banca;
- Orientadores;
- Amigos.

-  ABIDO, M. Optimal power flow using particle swarm optimization. *Eletrical Power and Energy Systemns - ELSEVIER*, 24:563-571, 2002.
-  BISKAS, P. et al. Comparasion of two metaheuristics with mathematical programmin methods for the solution of OPF. *Proc: in 13th International conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, vol.1, pp.: 16-24*, 2005.
-  CAPITANESCU, F. Critical review of recent advances and further developments needed in AC optimal power flow. *Electric Power Systems Research* 136:57-68, 2016.
-  CARPERTIER, J. Contribution to the economic dispatch problem. *Bull. Soc. Fr. Electri. vol. 8, no. 3, pp.: 431-447*, 1962.

-  DAS, S.; SUGANTHAN, P. Differential Evolution: a suvery of the State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. pp: 4-31, 2011.
-  FRANK, S.; STEPONAVICE, I.; REBENNACK, S. Optimal Power Flow: A Bibliographic Survey (I) - Formulations and deterministic methods. *Energy Systems. Springer*. vol .3, pp.:221-258, 2012.
-  FRANK, S.; STEPONAVICE, I.; REBENNACK, S. Optimal power flow: a bibliographic survey II: Non-deterministic an Hybrid methods. *Energy Systems, Springer, vol 3, pp.:259-289*, 2012.
-  GASPAR-CUNHA, A.; TAKAHASHI, R.; ANTUNES, C. *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. [S.l.]: Impresso pela Universidade de Coimbra, 1 Ed., 2013.

-  HATZIARGYRIOU, N. *Microgrids: architectures and control*. [S.l.]: Wiley, IEEE Press, 2014.
-  MONTGOMERY, D. *Design and analysis of Experiments*. [S.l.]: 8th edition, 2012.
-  NIU, M. et al. *Differential Evolution Algorithm with a Modified Archiving-based Adaptive Tradeoff Model for Optimal Power Flow*. [S.l.], 2014.
-  PEZZINI, P.; GOMIS-BELLMUNTA, O.; SUDRIÃ -ANDREUA, A. Optimization techniques to improve energy efficiency in power systems. *ELSEVIER In: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 2028 – 2041, 2011.
-  PHAM, H.; RUEDA, J.; ERLICH, I. Online Optimal control or Reactive sources in Wind Power Plants. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no.2, pp.:608-616, 2014.