



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GET/12  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

#### **GRUPO - XIV**

#### **GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO - GET**

#### **ALOCÇÃO ÓTIMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO USANDO ALGORITMO GENÉTICO COM ANÁLISE PROBABILÍSTICA**

**Sebastião Borges (\*)**  
**UFPA**

**Carolina Affonso**  
**UFPA**

**Roberto Limão**  
**UFPA**

**Joao Paulo Abreu Vieira**  
**UFPA**

#### **RESUMO**

Este trabalho propõe o uso da abordagem probabilística e algoritmo genético para alocação ótima de um sistema de distribuição de GD em unidades eólicas, a fim de minimizar as perdas de energia anual. O comportamento aleatório da velocidade do vento foi modelado usando a função de distribuição de probabilidade de *Rayleigh*, enquanto que o sistema IEEE *Reliability Test System* (IEEE-RTS) foi utilizado para modelar as variações de demanda durante o dia. Estes dois modelos são combinados em conjunto para gerar a função custo de perda de energia.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Alocação Ótima, Geração Distribuída, Energia Eólica, Análise Probabilística, Algoritmo Genético.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O aumento da demanda energética mundial, a implantação de normas que preveem o melhoramento da qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores e o crescente apelo às questões ambientais, têm incentivado alternativas de produção de energia que sejam menos poluentes. Essas tecnologias fazem uso de fontes renováveis que proporcionam menores impactos ao meio ambiente, como o uso da biomassa, da energia fotovoltaica, eólica, geotérmica, maremotriz e outras. Além disso, suas instalações são mais próximas dos centros consumidores, apesar de sua capacidade de geração ser inferior às grandes usinas, constituindo-se em unidades que se integram à rede de distribuição de energia elétrica, convencionalmente denominadas de Geração Distribuída (GD), como também podem constituir um pequeno módulo gerador para atender particularmente a um usuário.

A geração de energia com apenas uma fonte geradora é chamada Geração Centralizada (GC). Esta é caracterizada por grandes infraestruturas distantes dos centros consumidores, sendo constituída por extensas redes elétricas que transportam a energia à custa de muitas perdas de potência e maior fragilidade no sistema de fornecimento (1). Segundo dados do Balanço Energético Nacional dos últimos anos, a energia eólica é a que, destacadamente, mais apresenta crescimento de produção de eletricidade e de potência instalada (2). Contudo, há alguns problemas inerentes à inserção desta forma de GD na rede, principalmente por caracterizar-se numa fonte de energia primária que pode apresentar variações de velocidade durante épocas do ano, ou mesmo, em períodos do dia. Além disso, a ampliação das redes de distribuição e as interligações de sistemas elétricos regionais isolados contribuem para desestabilizar fatores que agregam à qualidade da energia, como a qualidade da tensão, a correção do fator de potência, a interrupção do fornecimento de energia para realização de manutenções e o aumento das perdas de potência (3).

A alocação das unidades de GD na rede, de maneira estratégica, indica os melhores pontos na rede para a instalação de uma unidade geradora.

Este trabalho está organizado com as seguintes seções: a seção 2 apresenta a descrição do problema, a seção 3 apresenta os métodos de análise probabilística e algoritmo genético, a seção 4 mostra os resultados do trabalho, e finalmente as conclusões são apresentadas na seção 5.

## 2.0 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para realizar uma alocação ótima de GD é necessário o estudo do fluxo de carga (FC) do sistema. O cálculo do FC de uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação dos valores de tensão nas barras e a distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos, como também outras grandezas peculiares, considerando restrições de geração, níveis de carga e a topologia da rede analisada. A análise desses parâmetros, para diferentes casos de operação na rede, aponta os melhores valores de número e localização de GD, valores de operação e a capacidade de geração de energia de cada GD juntamente com outras operando na rede, de modo que o mínimo de perdas e o máximo de eficiência sejam alcançados.

A análise do FC é feita através da modelagem da rede. Esta considera as grandezas elétricas iguais para todas as fases e desconsidera os efeitos transitórios na rede, o que permite representá-lo por um sistema de equações algébricas.

O sistema elétrico utilizado neste trabalho possui 33 barras, distribuídas de acordo com a topologia exibida na Figura 1.

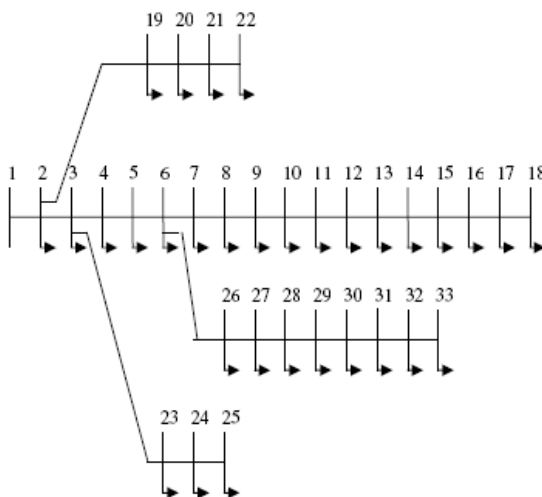


Figura 1 – Topologia do Sistema de Distribuição

A barra 1 representa a única barra de referência do sistema. Representa uma barra de geração de energia, servindo como referência angular para o sistema e, possibilitando o estudo do FC. Esta, também denominada *swing bus*, possui valores de módulo e defasagem angular da tensão, especificados,  $V$  e  $\delta$ , respectivamente. As outras barras representam as barras de carga ou barras PQ, onde os valores de potência ativa ( $P_g$ ) e potência reativa ( $P_q$ ) são especificados e, para alguns casos, neste trabalho, o valor do fator de potência (FP) é fixado para descobrir em que barra alocar a GD, como também sua potência; para outro caso, o valor do FP é variado para, além de descobrir a potência e a barra de alocação da GD, o FP em que este deverá operar para que o sistema tenha as perdas minimizadas.

O sistema possui restrições nos limites de tensão das barras, limites de potência ativa e limites no fator de potência:

- Tensão mínima = 0,9 V.
- Tensão máxima = 1,1 V.
- $P_g$  mínima = 0 W.
- $P_g$  máxima = 30% da soma das potências de demanda nas barras.

- FP mínimo em lead = 0,95.
- FP máximo em lead = 1,0.
- FP mínimo em lag = -0,99.
- FP máximo em lag = -0,95.

A próxima seção apresenta dois métodos: a abordagem probabilística, para a modelagem do sistema de distribuição eólico, considerando as variações na velocidade do vento e nas demandas da potência gerada, e o algoritmo genético, que realiza a busca das melhores configurações do sistema para que o mesmo tenha o mínimo de perdas.

### 3.0 - MÉTODO PROPOSTO

#### 3.1 Análise Probabilística

A metodologia de análise probabilística baseia-se no modelo de geração de carga probabilístico que combina todas as possíveis condições de funcionamento das unidades de GD e níveis de demanda com suas probabilidades (4).

O comportamento aleatório da velocidade do vento foi modelado usando a função de distribuição de probabilidade de *Rayleigh*, conforme expressão (1). Esta função foi usada em trabalhos anteriores com o mesmo objetivo (5).

$$f(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (1)$$

Da expressão (1) é possível calcular a velocidade média ( $V_m$ ) e o valor do escalar  $c$  (3), mostrado na expressão (2).

$$c \approx 1,128 v_m \quad (2)$$

As indústrias fornecem os valores de referências para o cálculo da potência das turbinas eólicas. As referências representam as potências e as velocidades de corte: *rated power* ( $P_r$ ), *cut in speed* ( $V_{ci}$ ), *rated speed* ( $V_r$ ), and *cut out speed* ( $V_{co}$ ). A relação entre potência ( $P$ ) e velocidade ( $V$ ) é mostrada na Figura 2.

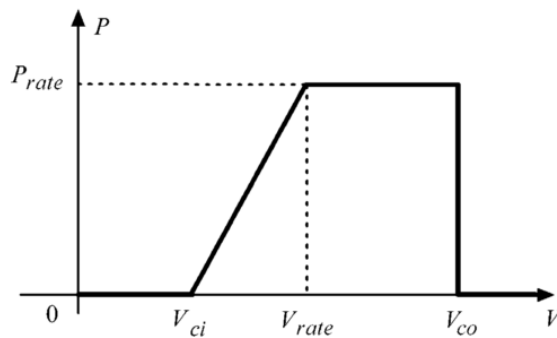


Figura 2 – Relação Potência x Velocidade

Portanto, a potência gerada da turbina eólica é calculada segundo a expressão (3).

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_{rated} * \frac{(v-v_{ci})}{v_r-v_{ci}} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{rated} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (3)$$

Este estudo considerou os seguintes valores de referência:

- $P_r = 1,1$  MW.
- $V_{ci} = 4$  m/s.
- $V_r = 14$  m/s.
- $V_{co} = 25$  m/s.
- $V_m = 6,07$  m/s.

A Tabela 1 apresenta os diferentes estados de potência e a probabilidade de ocorrência daquele estado, considerando a velocidade do vento e as variações nas taxas de potência.

Tabela 1 – Estado de Potência

| Estado de Potência (i) | Velocidade do Vento (m/s) | Rated Power (RP(i)) | Probabilidade da Potência (PP(i)) |
|------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 1                      | 0 – 4                     | 0                   | 0,347                             |
| 2                      | 5                         | 0,1                 | 0,125                             |
| 3                      | 6                         | 0,2                 | 0,119                             |
| 4                      | 7                         | 0,3                 | 0,105                             |
| 5                      | 8                         | 0,4                 | 0,087                             |
| 6                      | 9                         | 0,5                 | 0,069                             |
| 7                      | 10                        | 0,6                 | 0,051                             |
| 8                      | 11                        | 0,7                 | 0,036                             |
| 9                      | 12                        | 0,8                 | 0,024                             |
| 10                     | 13                        | 0,9                 | 0,015                             |
| 11                     | 14 – 24                   | 1                   | 0,022                             |

O sistema IEEE *Reliability Test System* (IEEE-RTS) (6) foi utilizado para modelar as variações de demanda durante o dia, tal como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Estado da Demanda

| Estado da Demanda (j) | Taxa da Demanda (RL(j)) | Probabilidade da Demanda (PL(j)) |
|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1                     | 1                       | 0,01                             |
| 2                     | 0,853                   | 0,056                            |
| 3                     | 0,774                   | 0,1057                           |
| 4                     | 0,713                   | 0,1654                           |
| 5                     | 0,65                    | 0,1654                           |
| 6                     | 0,585                   | 0,163                            |
| 7                     | 0,51                    | 0,163                            |
| 8                     | 0,451                   | 0,0912                           |
| 9                     | 0,406                   | 0,0473                           |
| 10                    | 0,351                   | 0,033                            |

Estes dois modelos são combinados em conjunto para gerar a função custo de perda de energia. Os 11 estados da potência gerada, combinados com os 10 estados de carga, apresentam 110 cenários com potência e demandas variadas, que podem ocorrer em 24 horas por dia e 365 dias ao ano, em um total de 8760 horas ao ano.

A expressão (4) representa as variações das probabilidades para potência e demanda. A expressão (5) representa as perdas de potência quando submetidas ao fluxo de carga, onde PD é o vetor de demanda das potências das barras que sofrem alteração com o RL do estado j. A expressão (6) a quantidade de horas em um ano. As expressões (4), (5) e (6) quando combinadas definem a função custo (7), onde i varia de 1 a 11 e j varia de 1 a 10.

$$\text{PROB}(i,j) = \text{PP}(i) \times \text{PL}(j) \quad (4)$$

$$\text{PERDA}(i,j) = \text{Perda}[\text{RP}(i) \times \text{Pr}, \text{RL}(j) \times \text{PD}] \quad (5)$$

$$\text{TEMPO} = 8760 \quad (6)$$

$$\text{CUSTO} = \sum \sum \text{PROB}(i,j) \times \text{PERDA}(i,j) \times \text{TEMPO} \quad (7)$$

### 3.2 Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos (AG) são técnicas de otimização inspiradas na teoria da evolução. Os conjuntos de soluções são representados por indivíduos, também chamados de cromossomos. Os indivíduos são formados por um conjunto de genes, onde cada gene é geralmente representado por um número binário. Segue a Figura 3, com as indicações para o modelo de gene e indivíduo, em uma população com quatro (4) indivíduos.

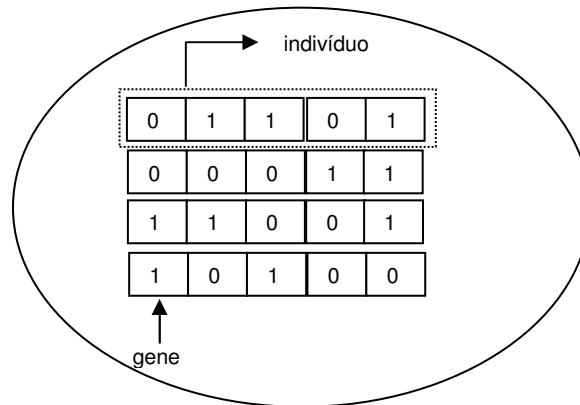


Figura 3 – Modelo de população de indivíduos em AG

A população de um AG é modificada a cada geração, onde os indivíduos de uma nova geração herdam os genes dos indivíduos, que foram selecionados, da geração anterior. Os pais são indivíduos que transmitem parte dos seus genes segundo algum critério de avaliação relacionado à função custo. Os indivíduos são criados através da operação de cruzamento de genes dos pais, após a criação de uma nova população, os indivíduos podem sofrer mutação dos seus genes, e também são avaliados para posterior seleção de pais.

O algoritmo deve possuir um critério de parada, para então buscar o indivíduo que obteve a melhor avaliação ao longo das gerações, e extrair as configurações que permitem alcançar o mínimo ou máximo de uma determinada função custo. A Figura 4 descreve um fluxograma com os principais passos executados em um algoritmo genético (7).

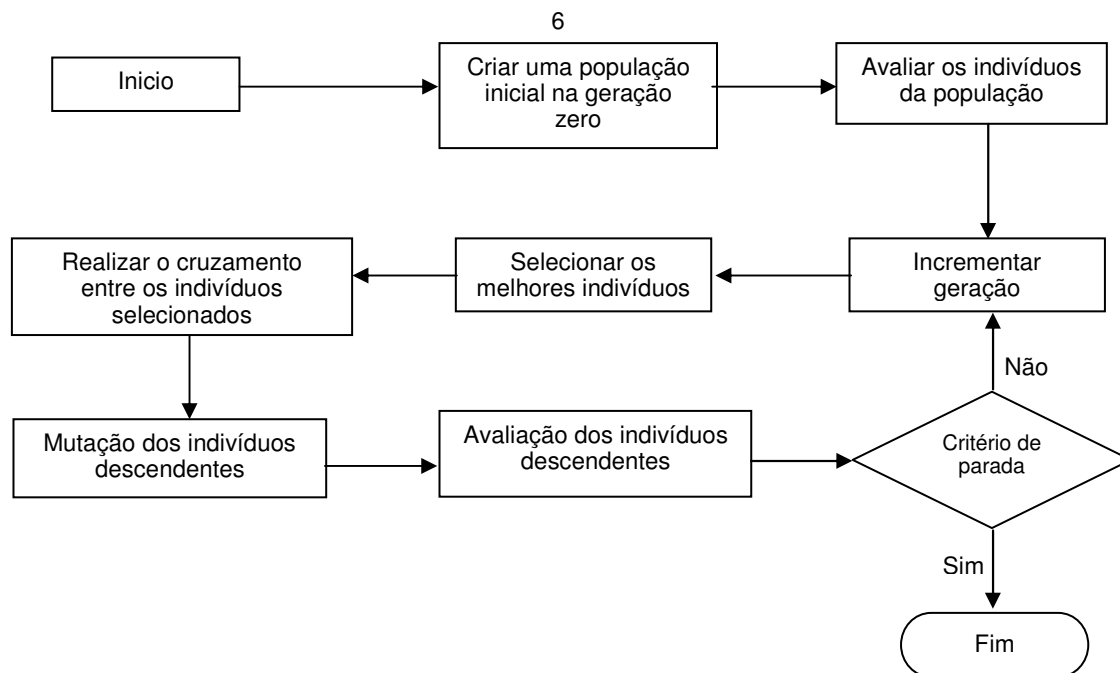


Figura 4 – Fluxograma de um AG canônico

Este trabalho utilizou no AG o método de seleção por torneio com dois indivíduos e fator de aleatoriedade ( $k$ ) de 25%. A seleção por torneio consiste em competições diretas usando como critério o valor da avaliação e o  $k$  que permite inverter o vencedor. A taxa de crescimento ( $tc$ ), que é o fator de reprodução, foi definida em 70% e a taxa de mutação ( $tm$ ) em 5%. O tamanho da população foi definido em 50 indivíduos e para o critério de parada do AG foi utilizada a quantidade de gerações, que foi definida em 100 gerações.

A próxima seção mostra os testes executados e os resultados obtidos nos experimentos.

#### 4.0 - RESULTADOS

Para realizar a alocação ótima da GD no sistema de distribuição, foi codificado um AG com a abordagem probabilística na linguagem de programação Matrix Laboratory (MatLab). Para executar a função objetivo foram usados os dados do Fluxo de Carga executados na biblioteca MatPower, usando o Método de Newton. O MatPower é um pacote que se integra ao Matlab, desenvolvido para resolver problemas de fluxos de carga e problemas de otimização de fluxo de cargas.

No experimento, foi utilizado o “case33”, do MatPower, para o fluxo de carga, que possui 33 barramentos. Os parâmetros FP, Pg e barra foram modelados com três conjuntos de genes, que juntos formaram um indivíduo com 20 genes.

Para comparar as perdas de energia anual foram criados três cenários:

- Sem Geração Distribuída
- Com Geração Distribuída e sem Análise Probabilística
- Com Geração Distribuída e com Análise Probabilística

A Tabela 3 mostra os resultados dos cenários propostos.

Tabela 3 – Resultados

| Cenários | Barra     | Potência de Saída (MW) | Fator de Potência | Perdas Anuais (MWh) |
|----------|-----------|------------------------|-------------------|---------------------|
| 1        | ---       | ---                    | ---               | 539,66              |
| 2        | 30        | 1,1                    | 0,95              | 520,19              |
| 3        | <b>30</b> | <b>0,7673</b>          | <b>0,95</b>       | <b>515,59</b>       |

A execução do AG permitiu encontrar a configuração que representa menor perda de energia anual. Nos ensaios realizados sem GD, que corresponde ao cenário 1, a menor perda anual foi de 539,66 MWh. Nos ensaios realizados com GD e sem análise probabilística, que corresponde ao cenário 2, a menor perda anual foi de 520,19 MWh. No cenário 3 foram usados GD e análise probabilística, onde a menor perda anual foi de 515,59 MWh, atingindo o melhor resultado do experimento.

O AG encontrou a configuração usada para alcançar a perda mínima no experimento com GD. A barra usada foi a 30, com o fator de potência de 0,95 e Pg de 0,7673 MW.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que o uso de GD em unidades eólicas permite a redução das perdas anuais de energia em um sistema de distribuição, em comparação a sistemas de distribuição sem GD.

A aplicação de técnicas, de abordagem probabilística, definiu um modelo mais realista que a abordagem tradicional, onde esta não considera a combinação das variações da potência gerada com as oscilações de demanda durante o dia.

O uso de AG possibilitou encontrar a configuração mais adequada para minimizar as perdas de energias em um cenário dinâmico e não determinístico.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ALVES, H.N., BRANCO, C.A.S.C, Um algoritmo genético para a alocação ótima de unidades de geração distribuída em redes de distribuição”; XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012.
- (2) BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, Relatório Final, Ano Base 2011 a 2013.
- (3) PRADO, I.F. Alocação de geração distribuída utilizando o algoritmo genético de Chu-Beasley e índices de sensibilidade; dissertation, Dept. Eng. Eletr., Univ. ABC, 2013.
- (4) ATWA, Y.M., EL-SAADANY, E.F. Probabilistic approach for optimal allocation of windbased distributed generation in distribution systems; IET Renewable Power Generation, 2009.
- (5) BOYLE, G. Renewable energy; Oxford University Press, 2004.
- (6) PINHEIRO, J.M.S., DORNELLAS, C.R.R., MELO, A.C.G. Probing the new IEEE reliability test system (RTS-96): HL-II assessment, IEEE Trans. Power Syst., 1998.
- (7) HOLLAND, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems; University of Michigan Press, 1975.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Sebastião Borges Fonseca**, nascido em 1981 na cidade de Belém do Pará, cursou graduação em Ciência da Computação (2004) pela Universidade Federal do Pará (UFPA) e cursou licenciatura em Matemática (2003) pela Universidade Estadual do Pará (UEPA). Atualmente é mestrando na área de Computação Aplicada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA. Tem interesse nas áreas de aprendizagem de máquina, otimização de sistemas e processamento de imagens.



**Carolina de Mattos Affonso** recebeu o grau de Bacharelado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Pará, Brasil, em 1998, o grau de Mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, em 2000 e o Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, em 2004. Atualmente, ela é professora de engenharia elétrica na Universidade Federal do Pará, Brasil. Seus interesses de pesquisa são em análise de estabilidade do sistema de energia, geração distribuída e mercado de eletricidade.



**Roberto Célio Limão de Oliveira** recebeu o grau de Bacharelado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Pará, Brasil, em 1987, o grau de Mestre em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil, em 1991, e o Doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, em 1999. Atualmente, ele é professor de Engenharia da Computação na Universidade Federal do Pará, Brasil. Seus interesses de pesquisa são em controle inteligente e computação natural.