



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO 4

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

**PLANEJAMENTO DA REDE COLETORA DE UM PARQUE DE GERAÇÃO EÓLICA USANDO UM
ALGORITMO GENÉTICO PARALELO COM DIMENSIONAMENTO DOS CABOS
BASEADO EM CONDUTORES ECONÔMICOS**

Helon D. M. Braz(*)
Chesf

Gustavo H. S. V. de Melo
Chesf

Benemar A. Souza
UFCG

RESUMO

Propõe-se um algoritmo genético (AG) dito Convencional e duas versões de AG Paralelo dedicados à solução do problema de síntese de redes em parques de geração eólica, englobando topologia e dimensionamento. As premissas adotadas no AG Paralelo são simplicidade de implementação e minimização do tráfego na rede. O problema é formulado tendo como objetivo minimizar investimento na rede de média tensão e perdas elétricas, computadas ao longo de 20 anos, atendendo restrições elétricas inerentes às redes desta natureza. Os algoritmos são validados por um comparativo dos resultados obtidos no projeto de um parque de geração eólica fictício com 74 aerogeradores.

PALAVRAS-CHAVE

Geração eólica, algoritmos genéticos, síntese de redes, configuração de redes.

1.0 - INTRODUÇÃO

Tomando como base o grande número de empreendimentos de geração de energia eólica contratados nos leilões de fontes alternativas realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL em dezembro de 2009 e Agosto de 2010, é possível afirmar que esta fonte de geração deixou de ser uma promessa, sendo uma realidade para a década que se inicia. De acordo com o modelo vigente, os empreendimentos que oferecem os menores custos pela energia gerada são declarados vencedores nos leilões. Essa sistemática de leilão, aliada à concorrência acirrada que vem sendo observada por conta do grande número de empreendimentos habilitados, têm levado cada vez mais à otimização das propostas. Neste sentido, o planejamento elétrico do parque eólico tem recebido importância crescente como item indispensável à elaboração de propostas competitivas e impactando nos investimentos, perdas elétricas resultantes e mesmo na confiabilidade.

O planejamento de um parque eólico é um estudo complexo, que engloba especificação dos aerogeradores, com suas respectivas posições geográficas definidas em função dos perfis de vento de cada região; alocação e especificação da subestação coletora de média tensão, considerando a disposição dos aerogeradores e o acesso à rede existente; configuração da rede coletora de média tensão interna ao parque; e conexão propriamente dita do parque à rede elétrica existente. O presente trabalho se restringe ao planejamento da rede coletora de média tensão, compreendendo a topologia da rede e o dimensionamento das interligações.

Trata-se de um problema de otimização reconhecidamente árduo, uma vez que o número de soluções candidatas cresce de forma combinatória em função do número de aerogeradores e condutores fornecidos. Além disso, o problema apresenta não-linearidades, objetivos conflitantes, e está submetido às seguintes restrições: radialidade, conexão, sobrecarga nos ramos, limites de tensões nodais e capacidade das subestações coletoras. Embora técnicas clássicas de otimização matemática tenham sido utilizadas no planejamento de redes radiais deste tipo

(*) Rua Delmiro Gouveia, N° 333, Ed. André Falcão - DEAT - Bloco D - Sala 205 - Bongi - CEP: 50761-901
Recife - PE - Brasil - Tel.: (+55 81) 3229-3934 - Fax: (+55 81) 3229-2488 - Email: helond@chesf.gov.br

(1 – 3), os chamados algoritmos evolucionários têm se mostrado mais adequados nos últimos anos (4 – 6). Dentre eles, destacam-se os Algoritmos Genéticos (AGs). Eles tem sido aplicados com sucesso na resolução de diversos problemas complexos de otimização e em diferentes áreas do conhecimento desde a década de 1990 e, por esse motivo, foram selecionados como ferramenta de otimização neste trabalho. Contudo, sua principal desvantagem é o alto tempo de processamento, motivo pelo qual há no estado da arte um grande número de artifícios matemáticos, variações do algoritmo e diferentes técnicas de codificação com o propósito de melhorar seu desempenho geral.

Neste trabalho, um AG para o planejamento da rede coletora de um parque eólico é descrito e testado. O diferencial desse algoritmo em relação a abordagem convencional utilizando AGs é a adição de duas modificações que visam melhorar a performance: a primeira, consiste em incorporar à formulação do problema o dimensionamento dos condutores como uma variável determinística associada ao cálculo dos condutores econômicos, reduzindo significativamente o espaço de busca das soluções; já a segunda, consiste em dividir o processamento do AG em várias máquinas, estabelecendo um tipo de AG paralelo capaz de reduzir o tempo total de processamento e, eventualmente, melhorar a performance. Tal algoritmo paralelo apresenta algumas vantagens em relação aos algoritmos paralelos descritos no estado da arte, pois sua implementação é mais simples e implica menos tráfego na rede. De fato, o presente algoritmo é uma evolução de (7) cuja principal inovação é o paralelismo na execução da otimização.

Nas seções a seguir são descritos, respectivamente: a formulação do problema, como tratado neste trabalho; a solução proposta; os resultados obtidos com as diferentes versões do AG em um sistema fictício de teste com 74 aerogeradores; e, por fim, as conclusões do trabalho.

2.0 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema do planejamento da rede coletora de um parque eólico como tratado neste trabalho pode ser enunciado como: *encontrar uma configuração radial ótima que conecte um conjunto de aerogeradores fornecido tal que o valor presente das perdas de energia no parque até um horizonte de planejamento somado ao investimento na sua construção seja mínimo*. Matematicamente, o problema pode ser enunciado de forma geral como:

$$\text{Min } f(\mathbf{u}), \text{ sujeito a } \mathbf{u} \in U \quad (1)$$

Sendo, \mathbf{u} uma configuração de rede coletora e U o conjunto de todas as configurações de rede coletora radiais conexas e que atendem às restrições elétricas do problema. As seguintes restrições elétricas foram consideradas: sobrecarga nos ramos, limites de tensões nodais e capacidade das subestações coletoras.

A função f é definida de acordo com os objetivos da solução e sua complexidade afeta o desempenho global do algoritmo, seja qual for a técnica de busca e otimização utilizada. Define-se deste modo um compromisso entre a exatidão de f em relação ao atendimento dos objetivos do problema e o custo computacional requerido para calculá-la. Neste trabalho, a função f a ser minimizada é definida efetivamente como:

$$f(\mathbf{u}) = w_1 f_{\text{investimento}} + w_2 f_{\text{perdas}} \quad (2)$$

Em que,

$$f_{\text{investimento}} = n_g \$c + \sum_{j=1}^{n_r} l_j \$r_j \quad (3)$$

$$f_{\text{perdas}} = F_p \Delta p \$_{MWh} \frac{[1 - (\frac{1}{1+i})^H]}{i} \quad (4)$$

são funções de custo que denotam, respectivamente, o objetivo de minimizar o investimento inicial na construção do parque eólico e o objetivo de minimizar as perdas de energia resultantes, contabilizadas desde a construção do empreendimento até um horizonte de H anos. Os pesos w_1 e w_2 são definidos para permitir diferentes ajustes de prioridade entre os objetivos. Além disto:

n_g	número de alimentadores;
$\$c$	custo por cubículo de saída de alimentador (R\$);
$\$r_j$	custo por km do condutor/estrutura ¹ a ser usado no ramo j (R\$/km);
n_r	número de ramos da rede coletora;
l_j	comprimento do ramo j (km);

¹ Está sendo utilizada esta denominação para aplicações de forma geral, embora neste trabalho tenha-se aplicado cabos subterrâneos para conexão dos aerogeradores.

F_p	fator de perdas;
Δp	perdas de energia na rede coletora (MWh/ano);
$\$_{MWh}$	custo da energia (R\$/MWh); e
i	taxa de correção a.a estimada.

Observe que no cálculo do investimento é considerado um custo fixo por alimentador e um somatório dos custos de construção de cada ramo da rede. Esse custo por ramo depende do seu comprimento e do tipo de condutor/estrutura utilizado. O valor presente das perdas é calculado a partir do total de perdas de energia do primeiro ano, considerando um horizonte de planejamento de H anos e uma taxa de correção anual i . Porém, essas perdas de energia do primeiro ano são obtidas indiretamente: a idéia é aplicar ao valor calculado supondo os aerogeradores continuamente gerando suas potências nominais um fator de perdas F_p , o qual modela as variações diárias e sazonais do vento na região do empreendimento.

Uma situação hipotética é representada na Figura 1. Pequenos círculos representam os aerogeradores, enquanto um círculo maior na origem dos eixos de coordenadas representa a única subestação coletora. Um modo de interligar os aerogeradores da Figura 1 utilizando um único alimentador é mostrado na Figura 2, em que cada tipo de traço representa um condutor/estrutura diferente.

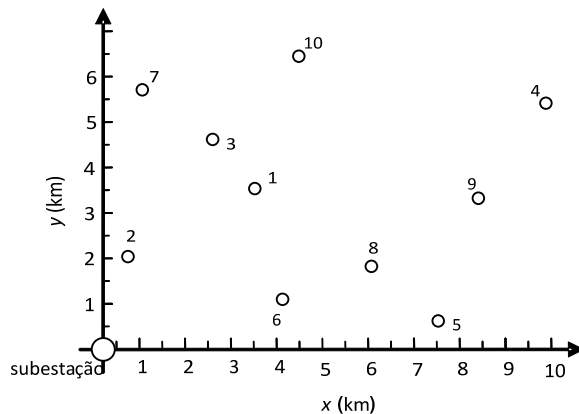


Figura 1 – Posição dos aerogeradores e da coletora para o sistema fictício de exemplo.

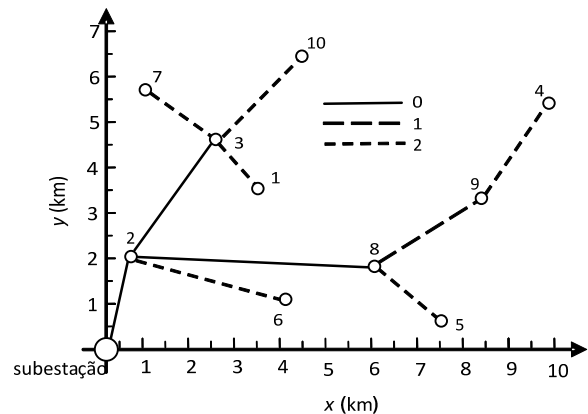


Figura 2 – Uma configuração factível para o sistema exemplo da Figura 1 usando três tipos de condutor/estrutura.

3.0 - SOLUÇÃO PROPOSTA

Para solucionar o problema formulado na Seção 2.0 foram implementados dois AGs: o primeiro, nomeado de Convencional, é um AG Canônico executado em uma única máquina sem qualquer paralelismo; o segundo, consiste em um conjunto de AGs Convencionais executados em diferentes máquinas de forma independente, ao qual foi incluído um artifício que permite que as melhores soluções sejam compartilhadas durante o processo de busca e otimização. As subseções 3.1 e 3.2 adiante descrevem, respectivamente, o AG Convencional e o AG Paralelo propostos.

3.1 AG Convencional

Trata-se de um AG do tipo geracional, com elitismo do melhor indivíduo, escalamento linear, operadores de cruzamento e mutação simples e parada em função do número de gerações. Como essas características são comuns à grande maioria dos AGs, a idéia aqui é restringir a descrição do algoritmo aos módulos inerentemente dependentes do problema, organizados em quatro subseções: pré-processamento, codificação, decodificação e função de aptidão.

3.1.1 Pré-processamento

Antes de iniciar a execução do AG, um estudo sobre os condutores/estruturas econômicos é realizado tomando como base uma lista de alternativas fornecida pelo usuário. O resultado desse estudo é uma tabela em que fica disponível para o AG qual condutor/estrutura é o mais indicado tecnicamente e economicamente para cada potência que eventualmente percorra o ramo. Considerando que a topologia da rede estabelece os fluxos nos ramos e para cada fluxo se sabe, à priori, o condutor/estrutura recomendado, o dimensionamento dos condutores/estruturas passa a ser determinístico em função da topologia da rede.

As análises que visam calcular condutores/estruturas econômicos são compostas por escolha de bitolas candidatas à aplicação no projeto; análise do desempenho técnico das alternativas sob o ponto de vista elétrico e térmico,

descartando aqueles com desempenho fora de critério; e avaliação econômica das alternativas tecnicamente aceitáveis, indicando a opção mais atrativa segundo as premissas assumidas. Adota-se como critério o valor presente das perdas de energia para cada condutor candidato somado ao seu respectivo investimento. O condutor desejado para um fluxo particular é aquele em que o custo total é menor dentre as alternativas analisadas.

Para realização da avaliação econômica são necessários os seguintes dados: horizonte da avaliação, taxa de desconto utilizada para atualização do valor das perdas, preço da energia para custeamento das perdas Joule, investimento associado a cada alternativa de condutor/estrutura, potência instalada nominal e fator de perdas. Em que, o fator de perdas F_p é definido como a razão entre perda média e perda máxima.

A perda máxima é obtida com certa facilidade, executando um algoritmo de fluxo de carga assumindo geração plena em todos os aerogeradores. Contudo, o cálculo da perda média depende do regime de operação previsto para os aerogeradores. Ou seja, o cálculo preciso do fator de perdas requer uma estimativa precisa do número de horas em que cada patamar de geração ocorrerá. Uma aproximação para o fator de perdas pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$F_p = K \cdot F_c^2 + (1 - K) \cdot F_c. \quad (5)$$

Em que: K é um fator dependente basicamente da fonte de energia primária e F_c é o fator de carga estimado para a região. No presente trabalho foi utilizado $K = 0.792$ e $F_c = 0.400$, logo: $F_p = 0.210$.

3.1.2 Codificação

O modelo genético empregado adota um único cromossomo com representação inteira e comprimento igual ao número de aerogeradores da rede. Cada gene estabelece um ramo que conecta um aerogerador à rede coletora. Para o exemplo da Figura 2, em que há uma única subestação coletora {0} e dez aerogeradores {1-10}, o indivíduo v que codifica a rede coletora da Figura 3 é o seguinte:

$v =$	11	11	11	11	11	11	11	11	11	Máximo Permitido {0-10}
	3	0	2	9	8	2	3	2	8	Cromossomo
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Aerogerador {1-10}

Observe que o cromossomo está destacado por um fundo cinza, colocou-se acima os limites máximos de cada gene e na linha inferior os identificadores dos aerogeradores. Na seção 3.1.3 há um exemplo desse modelo.

3.1.3 Decodificação

A decodificação de um indivíduo como descrito na subseção 3.1.2 é direta e adota como premissa uma rede inicial sem nenhum ramo. O procedimento consiste em percorrer o cromossomo v , em qualquer ordem, criando um ramo novo para cada gene avaliado. Para exemplificar, considere o primeiro elemento de v : o alelo 3 na posição 1 conduz a adição de um ramo conectando os aerogeradores {1} e {3}. Repetindo o procedimento para cada um dos genes, implica na criação de dez ramos que estabelecem a topologia da rede.

Com base na topologia da rede, é levada a efeito uma varredura reversa que permite estimar a potência transportada por cada um dos ramos. Tais valores são usados para selecionar os condutores/estruturas recomendados pela metodologia de escolha do condutor econômico. Uma vez definido o condutor/estrutura correspondente a cada ramo, o procedimento de decodificação estará finalizado, sendo obtida a rede da Figura 3.

A principal desvantagem da estratégia de codificação adotada é que além de configurações radiais conexas que são factíveis ao processo de otimização, o espaço de busca gerado pelo cromossomo da Seção 3.1.2 engloba um grande número de configurações infactíveis. Isto é, configurações com aerogeradores desconectados ou que violam a restrição de radialidade. Atenção especial deve ser dada ao ajuste da função de aptidão, de modo que a busca seja guiada pelas alternativas factíveis.

3.1.4 Função de Aptidão

De acordo com os preceitos da teoria dos AGs, cabe a função de aptidão f_{ap} medir quão boa é determinada solução em relação ao atendimento dos objetivos e restrições de um problema. As equações (2)-(4) formuladas na seção 2.0 abrangem os objetivos selecionados no presente trabalho, de modo que para formular f_{ap} resta incorporar as restrições do problema. A escolha foi pela inclusão de penalidades à formulação da seção 2.0 tal que f_{ap} é definida como:

$$f_{ap} = k_1 k_2 k_3 (f(\mathbf{u}) + f_{deconec}). \quad (6)$$

Sendo: k_1 , k_2 e k_3 fatores multiplicativos associados, respectivamente, às restrições de sobrecarga dos ramos, limites de tensões nodais e capacidade das subestações coletoras. O termo $f_{desconec}$ é um custo de penalização proporcional ao número de aerogeradores que permanecem desconectados numa dada configuração. Tais fatores são obtidos da seguinte forma:

$$k_1 = 1 + n_{vv} / 10, \quad (9)$$

$$k_2 = 1 + n_{vi} / 10, \quad (10)$$

$$k_3 = 1 + n_{vs} \text{ e} \quad (11)$$

$$f_{desconec} = \$_{\max} n_{desconec} \cdot \quad (12)$$

Em que: n_{vv} é o número de aerogeradores em que ocorreu violação de tensão nodal, n_{vi} é o número de ramos em que houve sobrecarga e n_{vs} é o número de subestações coletoras em que ocorreu violação de capacidade. $n_{desconec}$ é o número de aerogeradores que permaneceram desconectados ao término da decodificação de u , sendo $\$_{\max}$ um custo ajustado pelo algoritmo para ser maior que a conexão mais cara possível entre uma coletora e um aerogerador.

3.2 AG Paralelo

A pesquisa no estado da arte sobre AGs Paralelos se confunde com a pesquisa sobre os AGs propriamente ditos, remetendo a trabalhos publicados ainda na década de 1970. Isso se deve ao fato dos AGs promoverem essencialmente uma busca paralela no conjunto de soluções codificadas de um problema, o que lhes confere uma adequação inerente às formulações com processamento paralelo (8). Vários tipos de AGs Paralelos, com diferentes graus de complexidade de implementação e computacionais, foram propostos desde a década de 1970. Esses algoritmos consideram uma série de aspectos próprios da computação paralela, tais como: grau de granularidade da solução, frequência de sincronização dos processos e taxa de utilização/falhas da rede de computadores.

No presente trabalho, a ênfase não foi nos aspectos próprios da computação paralela. A idéia aqui é formular um AG Paralelo com complexidade de implementação e tráfego na rede local de computadores mínimos, de modo a torná-lo adequado à elaboração por programadores de nível intermediário e execução em um ambiente corporativo sem a necessidade de qualquer arranjo especial dos computadores.

Propõe-se implementar o paralelismo por meio do acesso a um arquivo compartilhado na rede local de computadores, denominado de *arquivo memória*. Esse arquivo contém uma lista com n indivíduos (cromossomo, aptidão) ordenada de modo decrescente segundo suas aptidões. Isto é, a melhor solução ocupa a 1ª posição no arquivo memória. O número máximo de indivíduos nessa memória é fixo, sendo adotado nesse trabalho o limite de 40 indivíduos.

O AG Convencional descrito na Seção 3.1 foi modificado apenas pela inclusão da habilidade de buscar no arquivo memória por soluções melhores que as suas próprias, operando como um *consumidor*, ou de contribuir com a memória, quando sua melhor solução possui aptidão superior a da melhor solução contida na memória. Nesse segundo caso, em que o AG Convencional opera como um *fornecedor*, a inclusão do indivíduo na memória é feita de modo a manter a ordenação da lista. Assim, a qualquer tempo, o AG pode determinar se vai consumir ou suprir o arquivo memória consultando exclusivamente o primeiro indivíduo no arquivo.

Duas versões do AG Paralelo foram desenvolvidas:

- Na primeira, o acesso ao arquivo memória ocorre em dois momentos: no início do algoritmo, quando a população é inicializada; e no final da execução, salvando na memória a melhor solução obtida desde que ela supere a melhor solução já incluída. Nessa versão, a troca de informações ocorre principalmente entre execuções do AG Convencional e depende da escolha por uma série de execuções.
- Na segunda versão do AG Paralelo, além dos acessos ao arquivo memória no início e término da execução, foi implementado um acesso periódico à área compartilhada. Tal parâmetro pode ser configurado pelo usuário, mas adotou-se nos testes desse trabalho um período de 50 gerações. Desse modo, a troca de informações ocorre entre instâncias em execução e entre diferentes execuções sequenciais do AG Convencional.

Por se tratar de uma área compartilhada, os AGs Convencionais precisam adotar um procedimento especial para acessar o arquivo memória. Em vez de implementar um único acesso determinístico, cada algoritmo tenta o acesso por um número de vezes configurável, esperando um tempo aleatório e crescente entre tentativas. Por exemplo, considere que o número de tentativas ajustado foi 10 e que uma instância do AG Convencional não conseguiu acessar o arquivo na sua primeira tentativa. O tempo de espera por uma nova será aleatório, mas contido no intervalo [0 – 500] ms. Caso novamente não seja possível acessar o arquivo, o intervalo de espera será

de [0 – 1000] ms, e assim por diante. Obviamente, a chance de insucesso no acesso ao arquivo memória cresce juntamente com o número de máquinas executando paralelamente.

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Para validação do AG Convencional e das duas variações do AG Paralelo propostos foi utilizado um parque de geração eólica fictício, composto por 74 aerogeradores de 2 MW de potência nominal, cada. Ilustra-se na Figura 3 sua disposição espacial, havendo uma única subestação coletora de 34,5 kV com 150 MVA de capacidade posicionada na parte inferior direita da figura ($x = 7.9568$ e $y = 2.5753$). Os dados completos são apresentados na Tabela 1.

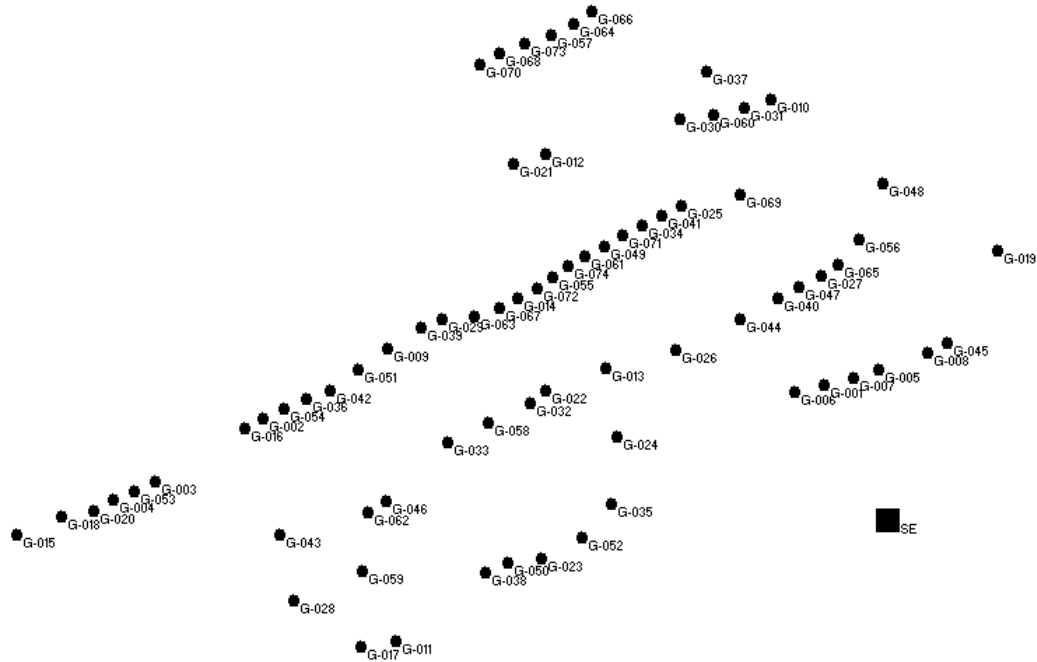


Figura 3 – Disposição espacial do parque fictício utilizado nos testes da Seção 4.0.

Nos três algoritmos testados, considera-se um custo de R\$ 100.000 por cubículo de saída de alimentador, um fator de perdas típico da região estudada $F_p = 0,210$, energia ao custo de R\$200/MWh, taxa de 11% de correção anual e um horizonte de planejamento de 20 anos, tanto para cálculo do valor presente das perdas quanto para o cálculo dos condutores econômicos. Os dados dos condutores/estrutura utilizados para o cálculo dos condutores econômicos são apresentados na Tabela 2, enquanto na Tabela 3 consta a correlação entre potências nos ramos e os respectivos condutores econômicos recomendados.

Nos três algoritmos foram adotados os seguintes parâmetros genéticos: população de 80 indivíduos, inicialização da população randômica, probabilidade de cruzamento de 80%, probabilidade de mutação de 8%, elitismo do melhor indivíduo e escalamento por ranking linear.

O AG Convencional (AG1) foi executado 6 vezes, adotando como critério de parada 1200 gerações. Os AGs Paralelos com acesso à memória no início/final da execução (AG2) e com acesso periódico (AG3) foram executados em 6 baterias de 3 máquinas em paralelo, totalizando 18 execuções. Contudo, foi adotado como critério de parada 400 gerações. Isto é, todos os algoritmos foram testados supondo um número constante de indivíduos avaliados igual a $(80 \times 1200 \times 6) = (18 \times 80 \times 400) = 576000$ vezes.

Apesar do número aparentemente significativo de indivíduos avaliados, é importante destacar que as configurações apresentadas nesta seção não representam projetos finais para o sistema coletor do sistema da Figura 3. O propósito é implementar um comparativo entre os algoritmos e analisar seus desempenhos relativos. Para que se tenha uma idéia do tamanho do espaço de busca tratado aqui, o número de configurações radiais conexas para o sistema da Figura 3 é da ordem de $7,5 \times 10^{138}$.

Partindo para os resultados propriamente ditos, considere os custos de perdas, investimento e total das três melhores soluções obtidas pelos algoritmos AG1, AG2 e AG3 conforme ilustrado na Tabela 4. Considerando que os algoritmos 1, 2 e 3 representam três gerações de um algoritmo, ao qual foram adicionados melhoramentos

sucessivos, os resultados foram aderentes ao esperado. Observa-se uma vantagem consistente do AG3 em relação aos demais e do AG2 em relação ao AG1, de modo que mesmo a 3ª solução de um algoritmo posterior é melhor em termos de custo total que a melhor alternativa obtida pelo algoritmo anterior.

A desvantagem do AG1 em relação aos demais era de certo modo evidente, uma vez que não há aproveitamento de soluções entre execuções do AG. Entretanto, a vantagem de AG3 em relação ao AG2 é um resultado significativo, que indica que o compartilhamento da informação teve efeito positivo no desempenho do algoritmo. Ou seja, o paralelismo além de permitir executar um número maior de gerações em um mesmo espaço de tempo, também se mostrou benéfico à convergência do AG na condição em que houve compartilhamento periódico de informações.

Retomando a Tabela 3, observe que a melhor solução avaliando custo global em geral não é a melhor quando são avaliados os objetivos de minimização de perdas e investimento separadamente. Esse resultado evidencia o mapeamento do problema em um estudo de minimização com objetivos conflitantes.

Tabela 1 – Dados de entrada do parque de geração eólica fictício utilizado nos testes comparativos dos algoritmos AG1, AG2 e AG3

ID	x (km)	y (km)	ID	x (km)	y (km)	ID	x (km)	y (km)
G-001	7,553	4,951	G-026	6,617	5,582	G-051	4,619	5,232
G-002	4,017	4,369	G-027	7,539	6,875	G-052	6,027	2,263
G-003	3,339	3,256	G-028	4,212	1,165	G-053	3,203	3,090
G-004	3,070	2,927	G-029	5,143	6,125	G-054	4,149	4,545
G-005	7,900	5,217	G-030	6,647	9,624	G-055	5,839	6,855
G-006	7,371	4,831	G-031	7,053	9,823	G-056	7,774	7,519
G-007	7,735	5,077	G-032	5,700	4,640	G-057	5,833	11,121
G-008	8,207	5,522	G-033	5,179	3,938	G-058	5,44	4,300
G-009	4,797	5,604	G-034	6,408	7,762	G-059	4,644	1,682
G-010	7,215	9,977	G-035	6,216	2,871	G-060	6,860	9,705
G-011	4,858	0,459	G-036	4,290	4,714	G-061	6,046	7,226
G-012	5,800	9,028	G-037	6,811	10,464	G-062	4,675	2,720
G-013	6,180	5,253	G-038	5,419	1,653	G-063	5,348	6,175
G-014	5,620	6,493	G-039	5,009	5,961	G-064	5,971	11,312
G-015	2,461	2,324	G-040	7,262	6,494	G-065	7,642	7,081
G-016	3,899	4,183	G-041	6,530	7,934	G-066	6,092	11,536
G-017	4,631	0,346	G-042	4,440	4,862	G-067	5,507	6,315
G-018	2,746	2,639	G-043	4,124	2,322	G-068	5,507	10,784
G-019	8,650	7,325	G-044	7,02	6,116	G-069	7,026	8,314
G-020	2,949	2,749	G-045	8,327	5,691	G-070	5,383	10,599
G-021	5,597	8,834	G-046	4,794	2,910	G-071	6,282	7,587
G-022	5,796	4,863	G-047	7,396	6,686	G-072	5,744	6,662
G-023	5,774	1,914	G-048	7,923	8,499	G-073	5,669	10,950
G-024	6,245	4,044	G-049	6,172	7,405	G-074	5,940	7,039
G-025	6,657	8,105	G-050	5,561	1,828			

Tabela 2 – Dados de entrada associados aos condutores/estruturas

Cabo	R (ohm/km)	X (ohm/km)	R\$/km	Capacidade
C095	0.4301	0.1420	78090	177
C120	0.3403	0.1360	83310	194
C150	0.2773	0.1340	89340	216
C185	0.2212	0.1290	94200	244
C240	0.1693	0.1220	100710	283
C300	0.1362	0.1190	113310	319
C400	0.1071	0.1150	130110	364

Tabela 3 – Condutores econômicos por faixa de potência nos ramos

Potência (MVA)	Cabo
2-4	C095
6	C120
8-12	C240
14	C300
16-30	C400

Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos no projeto da rede coletora do parque da Figura 3 utilizando os algoritmos AG1, AG2 e AG3

Algoritmo	Solução	Perdas	Investimento	Total
AG1	1	3919397.05	8012233.29	11931630.35
	2	3870785.77	8550341.12	12421126.89
	3	3800009.29	8755318.15	12555327.44
AG2	1	3560154.50	8004335.76	11564490.26
	2	3722343.48	7955665.05	11678008.53
	3	3682082.00	8104019.34	11786101.33
AG3	1	3648414.08	7661416.22	11309830.30
	2	3644691.17	7694297.09	11338988.26
	3	3666725.00	7699145.10	11365870.10

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto e validado um AG Paralelo dedicado ao projeto da rede de média tensão de parques eólicos, tendo sido utilizado como critério de otimalidade o custo total obtido pela soma do investimento com o valor presente das perdas anualizadas num período de 20 anos. As restrições de tensão nas barras de geração, suportabilidades dos condutores e capacidades das coletoras foram incluídas na formulação de forma efetiva, uma vez que não se verificam violações de restrições em nenhuma das soluções eleitas como viáveis.

Trata-se de uma terceira implementação de AG para solução do problema de síntese de redes coletoras em parques eólicos e os resultados obtidos apontam uma vantagem consistente dessa implementação em relação às versões anteriores do algoritmo. Sobretudo, quando ocorre compartilhamento periódico das melhores soluções encontradas por diferentes instâncias do algoritmo. Embora seja prevista uma restrição do AG Paralelo formulado em relação a um número limite de máquinas operando em paralelo, por conta do acesso compartilhado ao arquivo memória, a probabilidade de falha após 10 tentativas é reduzida e, mesmo que ocorra, não impede o prosseguimento da execução do AG.

Em síntese, os testes realizados apontam para uma vantagem do AG Paralelo que vai além da possibilidade de executar um número maior de gerações em um mesmo tempo de execução, tendo efeito positivo na convergência propriamente dita do AG. Tal resultado é especialmente promissor porque foi obtido mantendo as premissas de simplicidade de implementação e adequação ao uso em um ambiente corporativo sem qualquer arranjo especial dos computadores.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Jonnavithula, S.; Billinton, R., "Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 4, pp. 1935-1940, 1996.
- (2) Peponis, G. J.; Papadopoulos, M. P., "New dynamic, branch exchange method for optimal distribution system planning", IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., vol. 144, No. 3, 1997.
- (3) Boulaxis, N. G.; Papadopoulos, M. P., "Optimal Feeder Routing in Distribution System Planning Using Dynamic Programming Technique and GIS Facilities", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 17, pp. 242-247, (2002).
- (4) Miranda, V.; Ranito, J. V.; Proença, L. M., "Genetic Algorithm in Optimal multistage distribution network planning", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 4, pp. 1927-1933, 1994.
- (5) Fudou, H.; Genji, T.; Fukuyama, Y.; Nakanishi, Y., "A Genetic Algorithm for Network Reconfiguration using Three Phase unbalanced Load Flow", ISAP Intelligent Systems Applications to Power Systems, Seoul, Korea, 1997.
- (6) Li, D. D.; He, C.; Shu, H. Y., "Optimization of Electric Distribution System of Large Offshore Wind Farm with Improved Genetic Algorithm", IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh - PA, 2008.
- (7) Melo, G. H. S. V; Braz, H. D. M., "Planejamento da Rede Coletora de um Parque de Geração Eólica usando Algoritmos Genéticos Com Dimensionamento de Cabos baseado em Conductor Econômico", XIV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ – XIV ERIAC, 2011.
- (8) Konfrst, Z., "Parallel Genetic Algorithms: Advances, Computing Trends, Applications and Perspectives", Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Helon David de Macêdo Braz

Nascido em João Pessoa-PB no ano de 1978. Formado em Engenharia Elétrica, pela UFPB em 2002, Mestre em Engenharia Elétrica, pela UFCG em 2003 e doutor pela UFCG em 2010. Trabalhou em projetos de P&D junto à UFCG no desenvolvimento de aplicativos computacionais voltados para Sistemas de Distribuição. Em 2006 ingressou na Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) onde atua na área de estudos elétricos. Entre suas áreas de interesse estão técnicas de inteligência artificial aplicadas à otimização de sistemas elétricos de potência, planejamento da transmissão e distribuição de energia elétrica e desenvolvimento de aplicativos computacionais para apoio à realização de estudos elétricos.

Gustavo Henrique S. Vieira de Melo

Nascido em Recife-PE no ano de 1978. Formado em Engenharia Elétrica, pela UFPE em 2001, especialista em sistemas elétricos, pela UNIFEI em 2006. Trabalhou na Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) onde atuou na área de estudos especiais e qualidade de energia. Em 2002 ingressou na Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) onde atua na área de planejamento da transmissão de sistemas elétricos. Entre suas áreas de interesse estão otimização, métodos numéricos, estabilidade de tensão e eletromecânica e projeto de subestações.

Benemar Alencar de Souza

Nascido no Crato, Brasil, 1954. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e Ph.D. em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande, Brasil, em 1977, 1981 e 1995, respectivamente. Atualmente, é professor do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil. Suas atividades de pesquisa são centradas em métodos de otimização e técnicas de inteligência artificial aplicadas a sistemas de potência, transitórios eletromagnéticos, proteção, planejamento e operação de sistemas de potência.