

Algoritmo enxame de filas para localização ótima de turbinas eólicas

M. Firmino de Medeiros Júnior*. Paulo Cesar de S. Câmara**. Benemar A. de Souza***

*Departamento de Engenharia de Computação e Automação, UFRN,
Natal, Brasil, (e-mail: firmino@dca.ufrn.br)

**Departamento de Fontes Alternativas, Chesf, Recife, Brasil (e-mail:
pcesar@chesf.gov.br)

***Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, Brasil (e-mail:
benemar@dee.ufcg.edu.br)

Abstract: The main objective of this work is to propose a new heuristic, inspired by the problem of optimal location of wind turbine queues, to solve this problem, allowing the incorporation of different restrictions, with low computational cost. From measurements obtained from equipment installed on anemometric towers, with the objective of prospecting promising locations for the implementation of wind farms, a wind map is prepared for a micro-region, with the help of software used for this purpose. Wind speed data are collected and, from these, annual averages are calculated to create the map. The mesh of points representing the area of the region, obtained by means of the software, has an adjustable sample rate, so that the mesh points can be obtained as close to each other as desired, allowing to admit a continuous function to represent the annual average wind speed variation (and, consequently, wind generation potential) with geographic coordinates. Thus, there will be no harm in adopting an optimization method that considers a domain with continuous variables. Mesh points (coordinates and attributes) are stored as a list in shape file (.shp) files, which can be opened with the help of the free software QGIS. Then the data can be read and reorganized into tables, to be processed by any other program. Thus, it is possible to build a function to measure the aptitude of each point for energy generation. From there, an objective function can be specified for an optimization problem.

Keywords: Wind energy; wind turbines; optimal localization; optimization; PSO.

Resumo: O objetivo principal deste trabalho é propor uma nova heurística, inspirada no problema de localização ótima de filas de aerogeradores, para solucionar este problema, permitindo a incorporação de diferentes restrições, com baixo custo computacional. A partir de medições obtidas a partir de equipamentos instalados em torres anemométricas, com o objetivo de prospectar locais promissores para implantação de parques eólicos, é elaborado um mapa eólico para uma microrregião, com auxílio de softwares utilizados para este fim. Os dados de velocidade do vento são coletados e, a partir deles, são calculadas as médias anuais para criar o mapa. A malha de pontos representando a área da região, obtida por meio do software, possui uma taxa de discretização ajustável, de modo que os pontos da malha podem ser obtidos o mais próximo possível entre si, permitindo admitir uma função contínua para representar a variação média anual da velocidade do vento (e, conseqüentemente, do potencial de geração eólica) com coordenadas geográficas. Assim, não haverá mal em adotar um método de otimização que considere um domínio com variáveis contínuas. Os pontos de malha (coordenadas e atributos) são armazenados como uma lista em arquivos shape (.shp), que podem ser abertos com a ajuda do software livre QGIS. Em seguida, os dados podem ser lidos e reorganizados em tabelas, para serem processados por qualquer outro programa. Assim, é possível construir uma função para medir a aptidão de cada ponto para geração de energia. A partir daí, uma função objetivo pode ser especificada para um problema de otimização.

Palavras-chaves: Energia eólica; aerogeradores; localização ótima; otimização; PSO.

INTRODUÇÃO

Mesmo com a obtenção de campanhas completas de medições anemométricas e solarimétricas em alguns pontos de uma região de interesse, a identificação por parte de um possível investidor da melhor localização para instalação de uma usina eólica associada ou não com uma usina solar sempre representou algo desafiador, uma vez que outros

parâmetros não menos importantes devem ser considerados de forma simultânea, além do potencial eólico e solar, tais como a distância a subestações, carregamento do barramento de conexão a ser utilizado, facilidade de acesso, questões ambientais, complexidade maior ou menor na orografia do terreno, etc.

Levando em consideração características de cada local candidato a receber um possível Parque Eólico e/ou Solar em uma grande região de interesse, por exemplo, uma micro-região de um estado da federação, há uma intrínseca dificuldade em ponderar cada uma delas e trabalhar de forma conjunta, principalmente devido ao grande número de possibilidades de alocação das usinas combinado com o número de atributos a serem considerados.

O desenvolvimento de um método consistente e eficiente que permita a funcionalidade acima descrita traria ao investidor usuário uma certeza de que os recursos empenhados estariam sendo bem aplicados e que haveria uma diminuição da possibilidade da inviabilidade do futuro empreendimento.

Burke, D.J. & O'Malley, M.J (2008) apresentam uma metodologia para encontrar os pontos de conexão ideais em um sistema de transmissão existente, para conectar uma geração eólica "firme", de maneira a atingir as metas de penetração de energia renovável desejadas, de forma segura e com custo mínimo. A metodologia considera as dependências estatísticas geográficas da carga individual do barramento de conexão e da energia produzida pelo parque eólico, bem como as variações temporais da geração líquida de energia da planta convencional, relativamente à carga total do sistema, e nos padrões de vento. Isso é realizado usando uma técnica de fluxo de carga probabilístico, baseada em fluxo de carga DC e carga registrada, como também séries temporais de vento. Um modelo discretizado da função de densidade de probabilidade multidimensional resultante é usado para definir as restrições de fluxo de potência nos ramos, em um modelo de otimização de programação linear. O algoritmo adota como objetivo a alocação da capacidade eólica instalada, em relação ao recurso eólico e à capacidade de transmissão em cada área.

Rahmann & Palma-Behnke (2013) apresentam uma nova metodologia de otimização que consiste em encontrar uma localização aproximadamente ótima de turbinas eólicas (WTs) em uma rede de transmissão planejada de uma forma segura e econômica. Enquanto minimiza os custos de investimento de WTs, o algoritmo aloca as turbinas de modo que um nível de penetração de energia eólica desejado seja alcançado. A otimização considera as restrições de segurança de transmissão e estabilidade do sistema de potência. Os resultados da otimização fornecem aos reguladores um instrumento de apoio para dar sinais adequados aos investidores de WT, a fim de alcançar uma integração segura e econômica da rede de energia eólica. A proposta é especialmente direcionada a países no estágio inicial de desenvolvimento de energia eólica, onde o processo de integração da rede WT ainda pode ser influenciado pelos formuladores de políticas energéticas.

Nusair & Alasali (2020) apresentam um Fluxo de Potência Ótimo (FPO), formulado como um problema único e multi-objetivo para uma geração de energia convencional e fontes renováveis conectadas a uma rede de energia. As funções objetivo refletem a minimização do custo do combustível, emissão de gases, perda de energia, desvio de tensão e melhoria da estabilidade do sistema. Considerando o comportamento da geração renovável volátil e a incerteza na

previsão de energia da produção de energia eólica e solar como um problema de otimização não linear, este artigo usa funções de distribuição de probabilidade Weibull e Lognormal para estimar a produção de energia da geração renovável.

Em consonância com a abordagem de Nick, M. et al. (2011), que reconhece a complexidade do problema global de localização ótima de turbinas eólicas, dividindo-o em um problema mestre e outros escravos, o presente trabalho de investigação científica pretende resolver o problema mestre, empregando um método de otimização a ser desenvolvido, no sentido de incorporar com facilidade as incertezas decorrentes do processo usual de obtenção de dados, por meio de medições localizadas em apenas em alguns pontos de uma vasta região. Uma técnica de interpolação espacial, considerando incertezas, precisa ser incorporada (QGIS-Documentação, 2022).

Pretende-se resolver o problema de escolha da melhor localização de um conjunto predefinido de turbinas eólicas em uma área para a qual se dispõe de um mapa eólico. Idealizou-se uma solução por meio de um algoritmo do tipo PSO, porém respeitando algumas particularidades de projeto dos parques eólicos, conforme relacionadas a seguir:

- As turbinas são dispostas em filas, perpendiculares à velocidade preferencial do vento, de forma a obter aproveitamento máximo da potência eólica;
- Para parques eólicos com muitas turbinas, filas paralelas podem ser permitidas, possibilitando uma otimização da rede interna de escoamento da potência gerada;
- Uma distância mínima entre turbinas deve ser respeitada, para evitar interferência na geração de uma turbina pelo *vento turbinado* por outra turbina, ou seja, o chamado efeito esteira.

Para atender aos requisitos acima, decidiu-se criar um modelo simplificado em que todas as turbinas guardam uma distância fixa entre si e são dispostas em filas paralelas, que respeitam um espaçamento especificado. A quantidade e a potência nominal das turbinas são definidas pelo volume de investimento disponível e pela disponibilidade de máquinas no mercado. Esses parâmetros são considerados fixos, em uma primeira abordagem. O problema de otimização a ser resolvido, com essas simplificações, pode ser enunciado como: **localizar t turbinas, dispostas em f filas, em uma micro-região, para a qual se dispõe de um mapa eólico, de maneira a maximizar a extração de potência eólica do conjunto.**

A metodologia tem ainda por objetivo possibilitar a incorporação de características relevantes de outros trabalhos encontrados na literatura. O trabalho de Rahmann & Palma-Behnke (2013) tem como ponto forte não apenas a alocação ótima de geração eólica, mas também o atendimento a restrições impostas pelo sistema de transmissão e ainda restrições relativas à estabilidade do sistema. O trabalho de González et al. (2015), por sua vez, tem sua importância destacada por tratar do dimensionamento ótimo de um

sistema híbrido eólico-solar, para integração ao sistema elétrico existente. Já o trabalho de Alasali et al. (2020) destaca-se por tratar a natureza estocástica das cargas em estratégias ótimas de gerenciamento de energia.

Diferentemente da abordagem apresentada por Rahmann& Palma-Behnke (2013), que formulam o problema adotando uma discretização horária para análise da produção da energia e do atendimento às restrições, este trabalho considera como função objetivo a curva de produção média anual de energia, obtida com base em medições. Assim, o problema aqui resolvido se constitui em um problema preliminar, para posicionar as turbinas eólicas em uma área limitada, em que não existem ainda muitas alternativas para conexão do parque ao SIN.

De acordo com Parsopoulos & Vrahatis (2002), abordagem mais comum para resolver problemas de otimização restrita é o uso de uma função de penalidade. O problema restrito é transformado em um irrestrito, penalizando as restrições e construindo uma única função objetivo, que por sua vez é minimizada usando um algoritmo de otimização irrestrita. Essa é provavelmente a razão da popularidade da abordagem da função de penalidade, quando Algoritmos Evolucionários são usados para resolver o problema de otimização restrita.

Os autores apresentam nesse capítulo de livro uma investigação sobre o desempenho do método Particle Swarm Optimization (PSO), na solução de problemas de otimização restrita. O problema é resolvido através da minimização de uma função de penalidade não estacionária de atribuição de múltiplos estágios. Entretanto, ainda de acordo com os autores, o único método para definir funções de penalidade pertinentes consiste em tentativa e erro. Se os valores de penalidade forem altos, os algoritmos de minimização geralmente ficam presos em mínimos locais. Por outro lado, se os valores de penalidade forem baixos, dificilmente poderão detectar soluções ótimas factíveis. Dadas essas dificuldades, optou-se por explorar as particularidades do problema, para desenvolver um algoritmo simples, que viabilize a determinação de soluções factíveis. Consideram-se as turbinas eólicas como partículas que precisam estar alinhadas em um plano vertical, cuja interseção com a superfície representativa da função de produção de potência, define a curva de soluções factíveis.

2. ALGORITMO PSO BÁSICO

Apresenta-se, a seguir, a especificação do algoritmo básico proposto por (Kennedy & Eberhart, 1995).

Notação:

\mathbf{x}_i , $i=1, \dots, m$: vetor posição da partícula i ($i=1, \dots, m$), com n coordenadas;

\mathbf{v}_i , $i=1, \dots, m$: velocidade da partícula i , com n coordenadas, corresponde ao incremento que deve ser dado no vetor posição ($\delta \mathbf{x}_i$);

\mathbf{p}_i , \mathbf{pbest}_i (personalbest): vetor da melhor posição encontrada pela partícula i ;

\mathbf{g} , \mathbf{gbest} (global best): vetor da melhor posição encontrada por todas as partículas.

Atualização de Velocidade e Posição

$$\mathbf{v}_{ij}^{t+1} = W\mathbf{v}_{ij}^t + C_1r_{1j}(\mathbf{p}_{ij}^t - \mathbf{x}_{ij}^t) + C_2r_{2j}(\mathbf{g}_j^t - \mathbf{x}_{ij}^t)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{v}_i^{t+1} + \mathbf{x}_i^t, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

Na equação de velocidade, tem-se:

C_1 ; C_2 : parâmetros cognitivo e social, ou taxas de aprendizado;

W : constante de ponderação de inércia;

$r_{1j}; r_{2j}$: números aleatórios entre 0 e 1.

t : contador de iterações.

Diversificação e Intensificação:

O algoritmo Nuvem de Partículas apresenta um mecanismo bem balanceado entre diversificação e intensificação:

$$\mathbf{v}_{ij}^{t+1} = \overbrace{W\mathbf{v}_{ij}^t}^{\text{diversificação}} + \overbrace{C_1r_{1j}(\mathbf{p}_{ij}^t - \mathbf{x}_{ij}^t) + C_2r_{2j}(\mathbf{g}_j^t - \mathbf{x}_{ij}^t)}^{\text{intensificação}}$$

Redução Linear da Ponderação de Inércia:

A cada iteração, a ponderação é reduzida:

$$W^{t+1} = W_{\max} - t \cdot \left(\frac{W_{\max} - W_{\min}}{t_{\max}} \right)$$

Shi e Eberhart (1998) concluíram que os valores abaixo produzem bons resultados para uma grande variedade de funções, adotadas como padrão de teste de desempenho de algoritmos de otimização:

$$W_{\max} = 0,9; W_{\min} = 0,4; C_1 = C_2 = 2$$

3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Otimização com uma restrição de igualdade

Em uma primeira proposição de algoritmo modificado para PSO restrito, considera-se que uma das duas coordenadas de cada partícula tem sua velocidade determinada pela equação do algoritmo tradicional; a outra é calculada por meio da equação de restrição, que define o plano das turbinas. No exemplo a seguir, considerou-se a minimização da função W_{obj} , cujo esboço é apresentado na fig. 1.

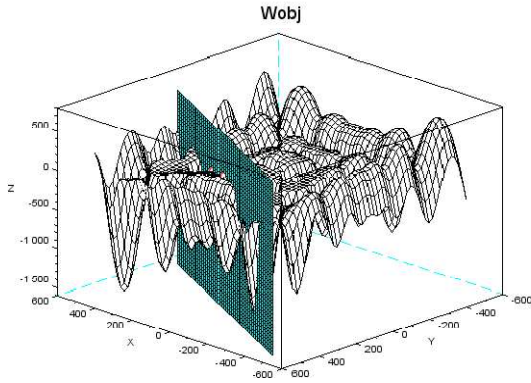


Figura 1: Função objetivo, W_{obj}

A fim de promover a distribuição inicial das partículas, duas estratégias, distintas em natureza, podem ser testadas, para cada problema específico: (a) usar as restrições para definir, deterministicamente, alguma(s) coordenada(s) das partículas, em um número suficiente, tal que as restantes possam ser calculadas por meio de um sistema de equações determinado (número de equações igual ao número de incógnitas); (b) *espalhar* aleatoriamente as partículas no espaço de busca e, em seguida, projetá-las sobre o subespaço das restrições. Na fig. 2, apresenta-se o resultado dessa estratégia, para o exemplo simples da fig. 1, em que a função objetivo se aplica a restrição imposta pelo plano perpendicular ao plano (x,y).

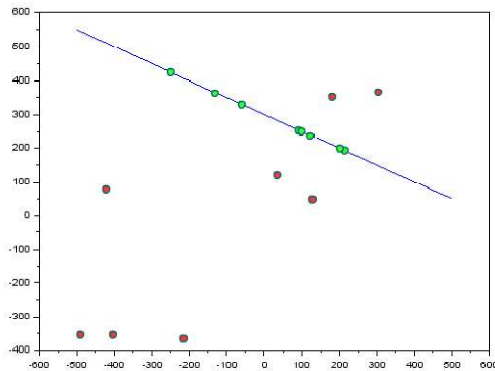


Figura 2: Distribuição preliminar de partículas (vermelhas) e sua projeção (pontos verdes) para atender à restrição de igualdade $x_1 + 2x_2 = 600$.

Para as várias execuções do algoritmo, não foi possível identificar ganho computacional em adotar uma ou outra estratégia de inicialização, de maneira a se poder generalizar.

3.2 Localização ótima de filas de partículas

Duas abordagens foram consideradas: as partículas são dispostas em filas paralelas, ou em fila única. Considerou-se ainda que as partículas de uma mesma fila devem ser equidistantes e no caso de filas múltiplas, estas devem ser paralelas entre si, respeitando uma distância preestabelecida. Essa condição imita a exigência imposta a

filas de turbinas eólicas, que devem ser dispostas perpendicularmente à velocidade do vento, para obtenção de aproveitamento máximo da potência eólica. Além disso, pode haver um parque eólico já instalado na mesma região, ou outro tipo de limitação, como por exemplo, elevações acentuadas do terreno, com alta turbulência do vento. Em tais casos, deve-se respeitar uma distância de segurança, para que não haja interferência eólica e prejuízo na produção de energia. Esse tipo de restrição está representado na fig. 3 pelo plano vermelho. Os planos azul, verde e ciano são os candidatos a receber as filas de partículas. Na presente abordagem, esses planos são equidistantes, visando à ocupação de uma área reduzida, pelo conjunto de partículas (turbinas eólicas). Portanto, a geração da nuvem inicial já deve respeitar essas restrições.

Apresenta-se na fig. 4 uma distribuição inicial (aleatória) de 15 partículas em três filas, a título de exemplo. Na seção 4, apresentam-se soluções para a distribuição ótima correspondente a esse exemplo, tanto para manutenção das filas paralelas, quanto para evolução para fila única.

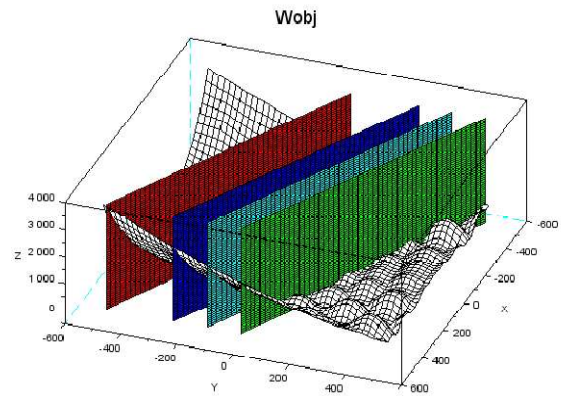


Figura 3: Função objetivo e planos dos aerogeradores em 3 filas; Plano vermelho: fila existente (de turbinas eólicas), para a qual se deve manter uma distância mínima; Planos azul, ciano e verde: localização das filas a posicionar, para minimizar a função W_{obj} .

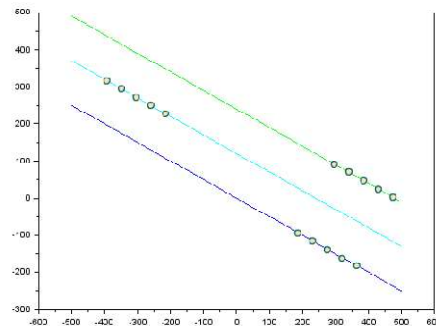


Figura 4: Curvas de nível dos planos para distribuição inicial (aleatória) de 15 partículas em 3 filas.

Para construção de um algoritmo semelhante ao PSO restrito, considerou-se que cada fila possui uma partícula *líder*, que será posicionada obedecendo à velocidade determinada pelo algoritmo PSO. As demais partículas são posicionadas segundo uma mesma regra (por exemplo, em torno da *líder*, uma a montante, outra a jusante, alternadamente, mantendo a fila), sempre guardando entre si a distância predefinida.

4. RESULTADOS

Para cada tipo de simulação apresentada nesta seção, informam-se os parâmetros que foram correspondentemente ajustados, como número de partícula e número de iterações permitidas. Entretanto, em todas as simulações, observou-se a necessidade de promover uma redução linear do fator cognitivo, semelhantemente à estratégia adotada para o fator de inércia:

$$C_1^{t+1} = C_{1\max} - t \cdot \left(\frac{C_{1\max} - C_{1\min}}{t_{\max}} \right)$$

$$C_{1\max} = 2,0; C_{1\min} = 0,5.$$

4.1 PSO com restrição de igualdade

Na fig. 5, apresenta-se a solução obtida por meio do algoritmo PSO restrito, adotando 08 (oito) partículas, após 20 iterações.

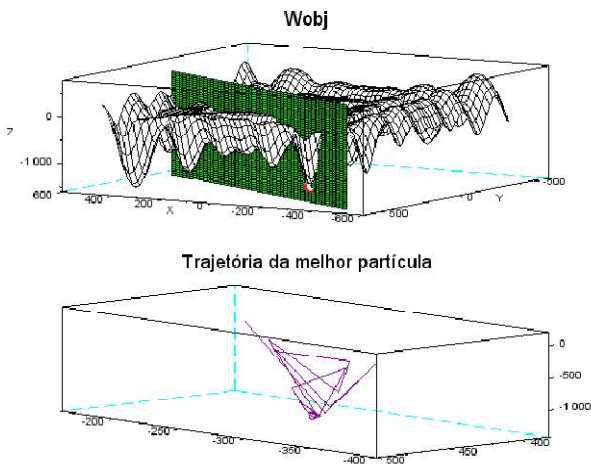


Figura 5: Resultado da aplicação do algoritmo PSO restrito.

Uma vez demonstrada a viabilidade de implementação do algoritmo PSO restrito através da abordagem simplificada, testou-se um algoritmo semelhante para a otimização do posicionamento de filas de partículas, representando filas de aerogeradores. Os resultados são apresentados a seguir.

4.2 Otimização de filas de partículas

4.2.1 Disposição em filas múltiplas

Para testar o algoritmo de posicionamento de filas, considerou-se que 15 (quinze) partículas devem ser dispostas em 03 (três) filas, de tal forma a minimizar o valor global da função objetivo (Wobj), igual à soma dos valores correspondentes a todos os pontos (partículas). Como simplificação, admitiu-se que as filas devem conter o mesmo

número de partículas. A distribuição inicial das partículas foi realizada de acordo com os requisitos especificados na seção 2.2, resultando na disposição apresentada na fig. 4.

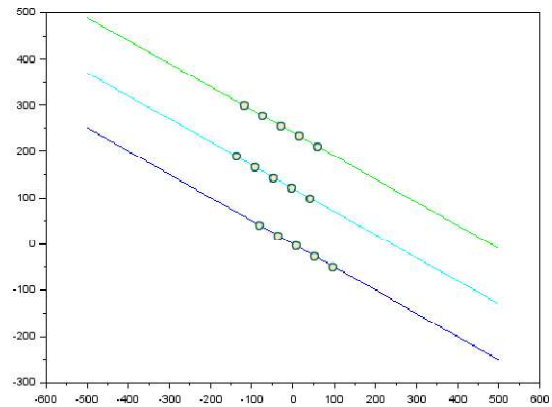


Figura 6: Localização final das filas para obter o valor mínimo da função objetivo.

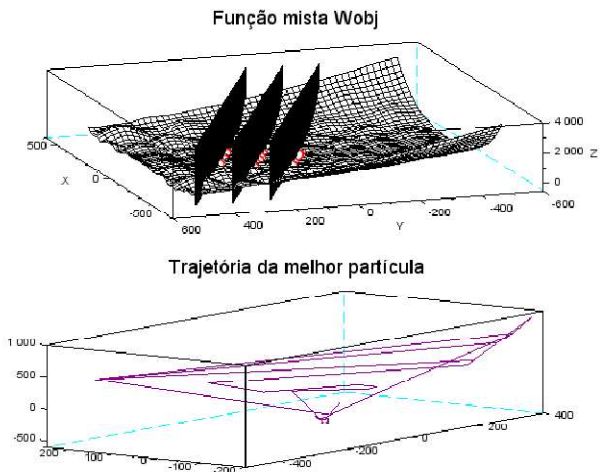


Figura 7: Distribuição ótima das partículas nos planos.

4.2.2 Partículas em fila única

Considerando que essa é uma forma que mais se aproxima da disposição encontrada em parques eólicos existentes, preferiu-se adotar um número maior de partículas por fila, uma vez que ao final será escolhida a melhor fila. Nesse caso, como as filas são os objetos que *voam* no espaço de busca, criou-se a ideia de *enxame de filas*. Assim, foi necessário definir a aptidão de cada fila. Considerou-se a aptidão de uma fila igual ao valor médio das aptidões de suas partículas.

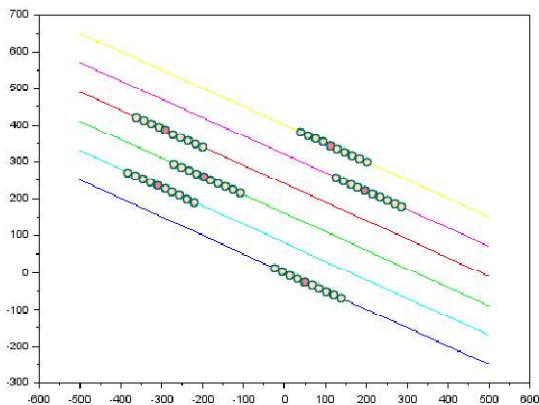


Figura 8: Localização inicial de 60 partículas em 6 filas.

Apresenta-se na figura 9 a disposição das filas, após 50 iterações.

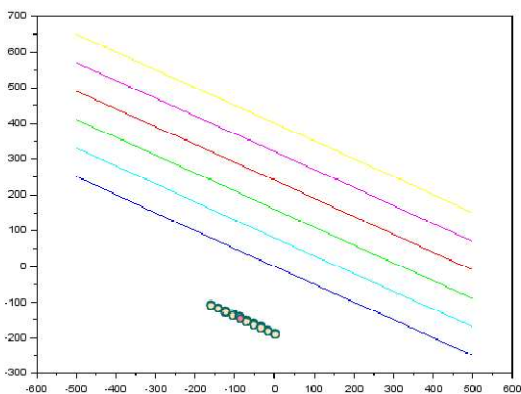


Figura 9: Localização das filas após 50 iterações.

A fim de proporcionar uma ideia de como as filas evoluíram até a convergência, mostram-se ainda as retas representativas dos planos que contêm as filas em sua disposição inicial.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma proposição preliminar de um algoritmo, baseado em PSO, para permitir o tratamento de restrições de igualdade, garantindo a obtenção de soluções factíveis, sem depender de funções de penalidade. Os testes realizados para o problema básico com uma restrição mostraram que apenas 08 (oito) partículas, com 20 (vinte) iterações, são suficientes para encontrar o ponto ótimo. Para o problema de posicionamento ótimo de um número fixo de filas, 30 (trinta) iterações foram sempre suficientes para alcançar a distribuição ótima das partículas, em todas as execuções. Outro problema de otimização tratado foi o posicionamento ótimo de uma única fila de partículas em uma superfície definida por uma função objetivo. Neste caso, introduziu-se o conceito de *enxame de filas*, considerando que ao final do algoritmo, a melhor fila será considerada como solução do problema. Para os próximos desenvolvimentos, planeja-se realizar testes com versões

melhoradas dos algoritmos, permitindo que todas as coordenadas do vetor solução tenham sua velocidade controlada pelo mecanismo do PSO, porém garantindo a factibilidade imposta pelas restrições práticas. Além disso, deve-se testar a possibilidade de deslocamento de partículas de uma fila para outra, resultando em filas com tamanhos diferentes, como também a criação de novas filas durante a execução do algoritmo.

REFERÊNCIAS

- Alasali, F.; Haben, S.; Foudeh, H. and Holderbaum, W.; A Comparative Study of Optimal Energy Management Strategies for Energy Storage with Stochastic Loads. *Energies* 2020, 13, 2596; doi:10.3390/en13102596, May 2020.
- Burke, D.J.; O'Malley, M.J. Optimal Wind Power Location Transmission Systems—A Probabilistic Load Flow Approach. In *Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS 08)*, Rincón, Puerto Rico, 25–29 May 2008.
- González, A.; Riba, Jordi-Roger; Rius, A.; Puig, R.; Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system. *Applied Energy* 154 (2015) 752–762, Elsevier, June, 2015.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 27 Nov.-1 Dec. 1995.
- Nusair, K. and Alasali F.; Optimal Power Flow Management System for a Power Network with Stochastic Renewable Energy Resources Using Golden Ratio Optimization Method. *Energies* 2020, 13, 3671; doi:10.3390/en13143671, July, 2020.
- Nick, M.; Riahy, G.H.; Hosseini, S.H.; Fallahi, F.; Wind Power optimal capacity allocation to remote areas taking into account transmission connection requirements. *IET Renew. Power Gener.* 2011, 5, 347–355.
- Parsopoulos, K.E.; Vrahatis, M.N. Particle Swarm Optimization Method for Constrained Optimization Problems. *Livro: Intelligent Technologies—Theory and Application: New Trends in Intelligent Technologies*, IOS Press - Ohmsha, pp 214–220, 2002.
- Rahmann, C.; Palma-Behnke, R. Optimal Allocation of Wind Turbines by Considering Transmission Security Constraints and Power System Stability. *Energies* 2013, 6, 294–311; doi:10.3390/en6010294.
- Shi, Y.; Eberhart, R. A modified particle swarm optimizer. *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98TH8360)*, Anchorage, AK, USA, 4–9 May 1998.
- QGIS - Documentação, consultada em fev/2022 em: https://docs.qgis.org/2.8/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction.