



MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA A SETORIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Sabrina da Silva Corrêa¹, Pedro Henrique Leite de Lima¹,
Andraia Azevedo Abrantes de Oliveira¹ e Saulo de Tarso Marques Bezerra^{1*}

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Av. Marielle Franco, Km 59, Nova Caruaru,
Caruaru, Pernambuco, Brasil, CEP 55014-900

¹ *saulo.tarso@ufpe.br*

RESUMO

A expansão acelerada das áreas urbanas, nos últimos anos, implicou no aumento da complexidade do gerenciamento dos sistemas de distribuição de água (SDAs), acarretando em altos índices de perdas de água. Diante disso, diversos estudos propõem a setorização dos SDAs para melhorar a gestão e a segurança operacional dos sistemas. Contudo, é complexo identificar qual é a melhor opção de setorização, uma vez que existe um grande número de combinações e os modelos existentes na literatura trazem uma série de limitações ao projeto. Assim, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um modelo híbrido para o projeto ótimo de distritos de medição e controle em sistemas de distribuição de água. A metodologia proposta combina os princípios da teoria dos grafos e o algoritmo metaheurístico binary particle swarm optimization para minimizar os vazamentos nas tubulações e os custos. O modelo foi aplicado em um sistema de distribuição real localizado na cidade de João Pessoa (Brasil). Os resultados atestam a eficiência do modelo proposto, com soluções ótimas semelhantes à setorização projetada pela empresa especializada. Conclui-se que o estudo apresenta uma abordagem prática e eficaz para a realização de projetos de distritos de medição e controle de sistemas de abastecimento de água.

Palavras-Chave

Sistemas de abastecimento de água, distritos de medição e controle, eficiência hidráulica, binary particle swarm optimization (BPSO), Dijkstra shortest path (DSP).

1. INTRODUÇÃO

A expansão acelerada de áreas urbanas intensificou nas últimas décadas a complexidade da gestão dos sistemas de abastecimento de água (SAA). Diante disso, recomenda-se a divisão dos sistemas em redes menores para melhorar o gerenciamento e a segurança operacional [1]. A setorização consiste na divisão do sistema em redes de menor dimensão, com fronteiras bem conhecidas e delimitadas. Essas redes são chamadas de Setores de Medição, Distritos

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

de Medição e Controle (DMCs) ou Zonas de Medição e Controle. Os DMCs são criados por meio do fechamento de registros ou desconexão de tubulações, de modo que a vazão fornecida ao sistema possa ser medida e controlada. É importante ressaltar que é comum, nas empresas de saneamento, a divisão dos sistemas de abastecimento de água em grandes setores, que não necessariamente são DMCs [2].

A setorização vem sendo aplicada com sucesso em sistemas de abastecimento de água do mundo inteiro, pois permite avaliar as perdas de água por meio de um balanço que compara a vazão macromedida, na entrada do DMC, com as micromedidas pelos consumidores contidos na área de abrangência do distrito correspondente. O cálculo do balanço hídrico é a base para a implementação das técnicas *bottom up* (de baixo para cima) de avaliação de perdas de água. Além disso, permite adequar as pressões de serviço dentro de limites aceitáveis, a detecção de vazamentos visíveis e não visíveis, a redução de obras de reabilitação, o gerenciamento da qualidade da água, e a proteção do distrito a contaminação acidental ou intencional [3].

Reparos de vazamentos, substituição de tubulações e reabilitação de redes podem ser alcançados mais rapidamente e de forma mais simples em setores isolados, porque o processo de parada de operação é mais simples durante a manutenção, não causando alterações nas outras partes das redes [4], contribuindo com as melhores práticas endossadas pela comunidade técnica-científica.

Contudo, é complexo identificar qual é a melhor opção de setorização de sistemas de distribuição de água, uma vez que existe um grande número de combinações, até mesmo no projeto de pequenas redes. Procurar as posições de inserção dos dispositivos (tanto os medidores de vazão quanto as válvulas de seccionamento) que possam dividir as redes em DMCs e ainda atender aos requisitos hidráulicos é computacionalmente pesado. Atualmente, a quase totalidade dos projetos de setorização de sistemas reais são elaborados com base na experiência dos projetistas, por tentativa e erro. O projeto de setorização é um desafio complexo para os técnicos, porque pelo menos três requisitos cruciais devem ser satisfeitos: 1) conectividade da rede, ou seja, cada nó da rede de distribuição de água deve ser conectado a pelo menos uma fonte de água; 2) atendimento da pressão mínima, ou seja, todos os nós devem ter pressão igual ou superior ao nível mínimo requerido para atender a demanda de água dos usuários; 3) o número de medidores de vazão e registros deve ser minimizado para reduzir custos e complexidade de gerenciamento [5].

Buscando o desenvolvimento de métodos para o projeto ótimo de distritos de medição, pode-se utilizar a teoria dos grafos e técnicas metaheurísticas. Os princípios da teoria dos grafos são, geralmente, adotados para o agrupamento dos nós e, conseqüentemente, formação de distritos [1; 4].

Diante do exposto, este trabalho apresenta um modelo para setorização de sistemas de distribuição de água que considera diversos fatores, tais como custos, pressão, tamanho e isolamento dos distritos, e ainda utilizar técnicas metaheurísticas de modo a obter soluções ótimas em um período de tempo razoável.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

2. METODOLOGIA

A abordagem de setorização proposta foi desenvolvida na linguagem de programação Python através do *integrated development environment* (IDE) livre PyCharm Community 2019.3.1, com o auxílio da biblioteca Epanettools, pacote que permite ao usuário utilizar todas as funções do kit de ferramentas do *software* EPANET 2.00.12 nos *scripts* Python.

De modo geral, os DMCs são definidos através da inserção de válvulas de seccionamento (registros) de modo a agrupar nós e trechos em setores isolados. Localizar os trechos que devem receber válvulas e medidores de vazão foi o objetivo da pesquisa. As válvulas de seccionamento devem ser inseridas em trechos que se deseja fechar o fluxo, para isolar os setores ou limitar as tubulações de entrada do setor. Os medidores de vazão devem ser instalados na entrada dos distritos, a fim de possibilitar o controle e gestão dos sistemas.

Com vista à obtenção da solução para o problema proposto, a metodologia foi constituída fundamentalmente por: (1) Definição da tubulação principal; (2) transformação da topologia da rede de distribuição de água em estrutura de grafos e agrupamento dos nós com o auxílio do algoritmo DSP [6] e, (3) otimizar a criação de DMCs. Inicialmente, os dados da rede, que se deseja realizar a setorização, são lidos a partir do arquivo de entrada (.INP) gerado no *software* Epanet, através da biblioteca Epanettools. O projetista deve definir a tubulação principal e informar parâmetros tais como a pressão mínima do sistema e tamanho máximo que os distritos devem possuir.

O modelo é baseado no trabalho de Zhang *et al.* [1], fundamentado no desenvolvimento de uma abordagem inovadora e adaptada do algoritmo de Dijkstra, baseado na análise do caminho mais curto para o agrupamento de nós combinado com técnicas para otimizar a formação dos distritos. Além disso, tendo em vista a complexidade do problema, um algoritmo *binary particle swarm optimization* (BPSO) foi desenvolvido para buscar a melhor combinação de condição do trecho (aberto ou fechado) enquanto satisfaz as condições de restrição.

O algoritmo BPSO foi adotado porque o problema é caracterizado como discreto e binário, onde a configuração do trecho pode assumir o valor 0 (tubulação fechada) ou 1 (tubulação aberta). Essa abordagem vem se destacando em problemas de otimização, uma vez que é necessário menos indivíduos e iterações para convergir para uma solução ótima, acarretando menos tempo de processamento. Este foi um dos motivos pelos quais foi adotado o algoritmo BPSO na pesquisa. Vale ressaltar que este método metaheurístico não foi aplicado em nenhum estudo com a esta finalidade.

2.1 AGRUPAMENTO DE NÓS

A tubulação principal é composta por tubulações de grandes diâmetros e conseqüentemente transportarem grande quantidade de água, sua origem parte do reservatório, e devem alimentar os DMCs formados posteriormente. Uma vez definida esta tubulação, foram identificados os trechos que serão variáveis de decisão (tubulações derivantes), isto é, trechos que podem receber seccionamento (registros) ou medidores de vazão. Esses trechos estão conectados diretamente com a tubulação principal.

Após a definição da tubulação principal, o modelo transformou a topologia da rede de distribuição em estruturas de grafos não dirigidos, onde os vértices representam os nós e as

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

arestas representam os trechos, sem sentido definido. A partir da representação da topologia através de matrizes, o modelo agrupou os demais nós que não estão na tubulação principal, com base no caminho mais curto. Para isso, o algoritmo DSP [6] foi utilizado para encontrar o caminho ótimo da água entre o nó i e o ponto final k (reservatório). Em combinação da Matriz_Ponderada, com valores dos pesos dos trechos, foi obtido o menor caminho a partir da Equação (1):

$$distância_{ki} = \sum w_t t \in \{caminho_{ki}\} \quad (1)$$

Onde: w_t é o peso do trecho t ; $\{caminho_{ki}\}$ é o conjunto de trechos que correspondem ao caminho mais curto entre o nó inicial k (reservatório) e o nó i .

O coeficiente de resistência da tubulação, calculado pela fórmula de Hazen-Williams, foi utilizado como valor para o peso da tubulação, conforme a Equação (2):

$$wt = 10.67 \cdot C_t^{-1.852} \cdot d_t^{-4.871} L_t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

Onde: C_t é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams da tubulação do trecho t ; d_t é o diâmetro da tubulação do trecho t ; L_t é o comprimento do trecho t , e T é a quantidade de trechos.

Os distritos formados representam o conjunto de caminhos (trechos) que possuem menores resistências. A quantidade de DMCs gerados, representa o número máximo de setores que a rede analisada comportaria, implicando em alto custo de operação e inviabilidade técnica de implementação, logo se torna necessária a utilização de mais uma etapa para mesclar os distritos, obtendo a solução final.

2.2 OTIMIZAÇÃO DOS DISTRITOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE

Para solucionar o problema de otimização aqui proposto, optou-se pelo uso da técnica de otimização metaheurística *binary particle swarm optimization* dada sua robustez e velocidade de processamento. No algoritmo BPSO, proposto por Khanesar et al. [7], cada partícula representa sua posição em valores binários 0 ou 1, e a velocidade pode ser interpretada como na versão do PSO clássico, ou seja, representa a taxa de variação de bits de partículas.

Para cada iteração, foi necessário realizar a simulação do sistema de distribuição de água, caracterizado pela nova setorização, através da biblioteca Epanettools, e o novo desempenho é investigado calculando a função objetivo. Logo, a implementação da técnica de setorização dentro da classe BPSO se tornou essencial.

A posição da partícula informa a situação dos trechos de derivação, indicando se a trecho deverá permanecer aberta (1) ou fechada (0). A cada iteração uma nova topologia da rede é formada com as novas conexões, logo, é preciso atualizar a Matriz_de_Adjacência e a Matriz_Ponderada, e calcular os novos caminhos mais curtos com a utilização do algoritmo DSP, formando novos distritos. A partir dos novos distritos criados, foram identificados os

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

trechos limites, que são trechos que conectam dois DMCs. É imprescindível inserir válvulas de seccionamento nessas tubulações de modo que os setores sejam isolados.

A otimização do projeto ótimo de distritos de medição buscou a redução da pressão do sistema, de modo a minimizar as perdas de água reais, sem afetar o atendimento às demandas dos consumidores, além de minimizar os custos de implantação do projeto. Desse modo, o modelo utiliza a função objetivo descrita na Equação (3), considerando os custos dos dispositivos necessários para a implementação do projeto, pressão do sistema e tamanho dos DMCs.

$$FO = \sum_{j=1}^{k_{v\u00e1lvula}} C_{v\u00e1lvula}(D_j) + \sum_{m=1}^{k_{medidor_vaz\u00e3o}} C_{medidor_vaz\u00e3o}(D_m) + Pen \quad (3)$$

Onde: $C_{v\u00e1lvula}$ é o custo da válvula de seccionamento, $C_{medidor_vaz\u00e3o}$ é o custo do medidor de vazão, $k_{v\u00e1lvula}$ é o número total de válvulas de seccionamento, $k_{medidor_vaz\u00e3o}$ é o número total de medidores de vazão, $Pen_{pressão}$ é penalização pelo não atendimento das restrições.

Ao definir a delimitação dos DMCs, foram identificados os trechos limites, que são trechos cujos nós inicial e final estão localizados em diferentes distritos. Enquanto isso, os trechos que partem da tubulação principal e conectam os possíveis distritos (tubulação derivantes) são as variáveis de decisão do problema. Através de combinações, as melhores soluções foram identificadas. Nesse conjunto, os trechos que permanecerem abertos receberam medidores de vazão, e os demais receberam válvulas de seccionamento. As seguintes restrições foram impostas ao modelo híbrido: distritos isolados, pressão mínima em todos os nós e tamanho máximo dos distritos.

Diferentemente de problemas contínuos solucionados pelo PSO clássico, em problemas discretos não é necessário definir limite do espaço de busca. Além disso, deve-se ter atenção na definição do número de partículas e número de iterações, uma vez que a biblioteca Epanettools permite somente realizar 160 simulações hidráulicas. Logo, para o modelo convergir a bons resultados de modo mais rápido, foi necessário inicializar as partículas numa posição relativamente favorável. A posição inicial está relacionada com as extensões do agrupamento dos nós, de modo que os trechos (variáveis de decisão) que alimentam os grupos de maiores extensões devem inicializar na posição 1 (aberto), enquanto os trechos que alimentam os grupos de menores extensão devem inicializar na posição 0 (fechado).

3. RESULTADOS

O modelo híbrido foi aplicado na setorização do sistema de distribuição de água da Zona de Pressão R37 (ZP R37), localizada em João Pessoa, PB, Brasil. É importante ressaltar que este estudo utilizou versões reabilitadas dos sistemas. Além disso, foi utilizado o cenário de demanda máxima horária, para o dia de maior consumo, considerando as perdas futuras de água (esperadas) na rede de abastecimento, para os dados de vazões médias mensais estimadas para o ano de 2034 (final do plano).

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

A ZP R37 é composta por 1.045 nós, 1.251 trechos, e um reservatório com cota piezométrica de 70 mca. A rede é constituída por tubulações de PVC, com índice de perda na distribuição de 31,2% (SNIS, 2018). A maior pressão nodal do sistema corresponde a 63,82 mca, e a menor pressão nodal é de 10,26 mca. O volume diário de abastecimento de água é de aproximadamente 14.786 m³.

A tubulação principal foi caracterizada por possuir grandes diâmetros e conseqüentemente suportarem grandes vazões. As variáveis de decisão do problema foram os trechos derivantes da tubulação principal. Em seguida, foram definidos os parâmetros do BPSO e as configurações para o projeto: $c_1 = c_2 = 1$; $\omega = 0,5$; número de partículas = 4; número de iterações = 20; $P_{min} = 10$ mca; $máxSize = 30$ km e $N_1 = 2$.

Após a leitura de entrada do arquivo (.INP), foram criadas as matrizes para representação da topologia em grafo e, em seguida, definidos dez DMCs através do agrupamento de nós (Figura 1a). Logo, para este projeto de setorização, seriam necessários dez medidores de vazão, representando as variáveis de decisão do problema, e dezesseis válvulas de seccionamento para o fechamento dos trechos, de modo que os distritos se mantenham isolados e abastecidos através de uma única tubulação de entrada. Este agrupamento não representa a solução otimizada. Logo, os distritos formados foram mesclados de modo a encontrar uma solução viável economicamente e tecnicamente. Os trechos que alimentam os distritos maiores iniciaram na posição 1 (aberto), enquanto os trechos que alimentam os distritos menores iniciaram-se na posição 0 (fechado).

Os valores de penalização α e β foram calibrados através de testes de verificação, de modo que o algoritmo de otimização reconhecesse a solução ótima. Logo, as penalizações α e β assumiram os valores 10 e 5 respectivamente. Em seguida, para solucionar o problema de otimização aqui proposto e formação dos distritos de medição e controle, utilizou-se técnicas de otimização metaheurística *binary particle swarm optimization* com a função objetivo e restrições conforme formulação apresentada no capítulo anterior. Assim, o modelo convergiu para a solução ótima com cinco DMCs (Figura 1b). Por conseguinte, o custo total referente aos valores dos dispositivos foi de R\$ 147.934,99, sendo R\$ 38.923,90 referente aos custos das válvulas de seccionamento e R\$ 109.011,09 os dos medidores de vazão, considerando 1 RMB (Renminbi) igual a R\$ 0,82.

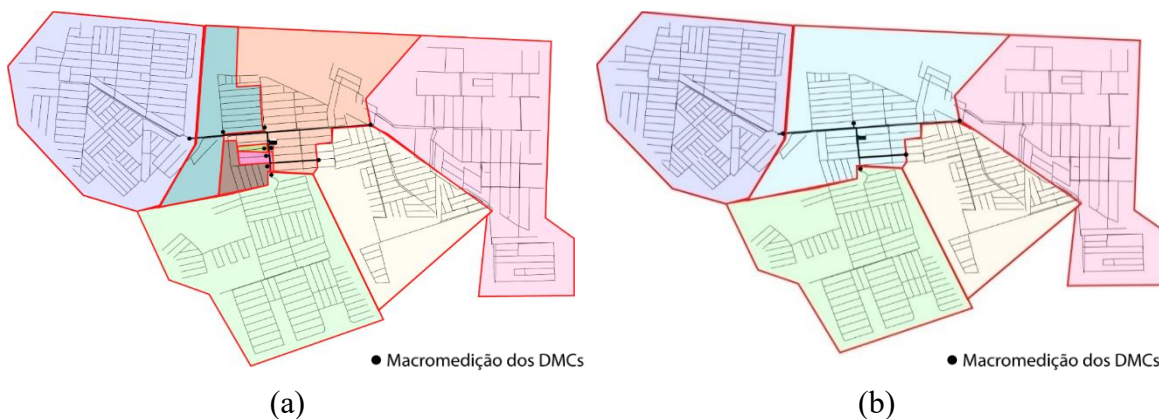


Figura 1 – Projeto de setorização da Zona de Pressão R37: a) através do algoritmo DSP e b) solução otimizada.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

A análise apontou que o projetista desempenha um papel determinante no projeto de setorização ao definir a tubulação principal, uma vez que as variáveis de decisão são dependentes desta definição. Apesar disso, a abordagem proposta traz a vantagem de indicar apenas uma única solução ótima, que atende às restrições impostas e maximiza os benefícios indicados nas funções objetivas. Dessa forma, não há necessidade de avaliar todas as soluções ótimas do conjunto de Pareto, como alguns modelos existentes na literatura. Por outro lado, a pré-seleção das partículas foi utilizada no intuito do BPSO chegar à solução ótima mais rapidamente, mostrando ser uma estratégia eficiente.

É importante observar que a solução ótima encontrada pelo modelo é muito semelhante à setorização projetada pelos especialistas (Figura 2). As principais diferenças estão nos trechos limites, mudando um pouco o tamanho e formato dos setores.

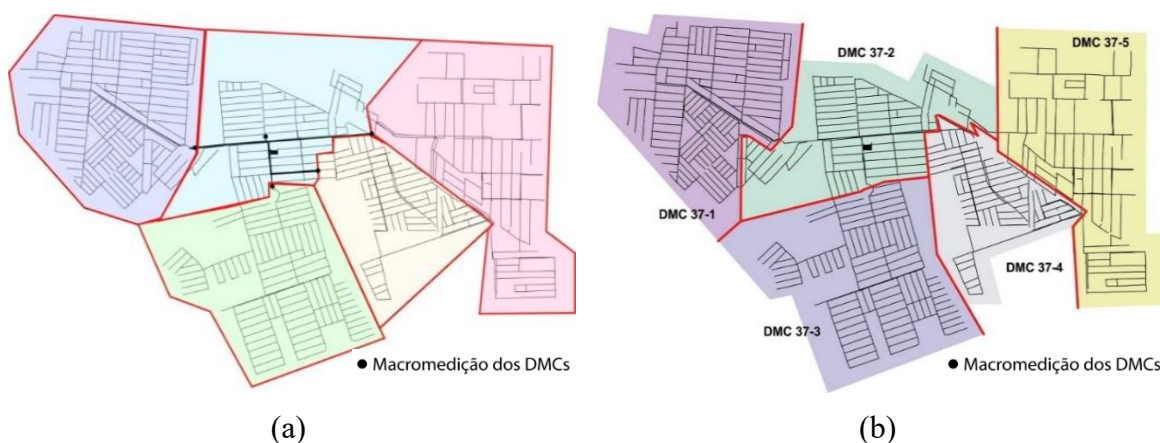


Figura 2 – Projeto de setorização da ZP R37 (a) modelo proposto e (b) Hidrainfo.

4. CONCLUSÕES

Os resultados da aplicação do modelo híbrido proposto nos estudos de casos foram bons, com a formação dos distritos resultando em soluções aplicáveis e coerentes. As soluções apresentaram redução de pressão em relação à configuração original (antes da setorização), o que evidencia que a setorização proposta implicaria na redução de perdas de água. Cabe destacar que a redução de perdas de água não se limita apenas à conservação do recurso hídrico, mas também tem influência na redução do consumo de energia elétrica, utilizado pelas estações elevatórias e consequentemente na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), que contribuem para o aquecimento regional e global, benefícios esses não quantificados nesse trabalho.

Por fim, conclui-se que a metodologia desenvolvida cumpriu os objetivos pretendidos, na busca do desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o projeto ótimo de distritos de medição e controle de sistemas de distribuição de água, que vise à minimização dos vazamentos nas tubulações, justificando os investimentos necessários para sua implementação. Ademais, além de ser de fácil aplicação, a abordagem multiobjetiva desenvolvida neste trabalho não apresenta limitações, desde que o sistema possua capacidade de transporte compatível com a setorização, podendo ser aplicado em sistemas reais.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) (Brasil) [processo IBPG-0244-3.01/18], do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) (Brasil) [processo nº 420012/2021-4, processo nº 308202/2022-8], e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Brasil) [processo nº 88882.380441/2019-01, Código Financeiro 001].

REFERÊNCIAS

- [1] K. Zhang, H. Yan, H. Zeng, K. Xin, T. Tao, “A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network”, *Science of The Total Environment*, vol. 656, 2019, pp. 1401-1412.
- [2] S. T. M. Bezerra, H. P. Gomes, “Controle de Perdas de Água”, In: GOMES, H. P. (Org.), *Abastecimento de Água*, 1ed. João Pessoa: Editora UFPB, 2019, vol. único, pp. 347-402.
- [3] J. Liu, R. Han, “Spectral clustering and multicriteria decision for design of district metered areas”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 144, no. 5, 2018, pp. 04018013(1-11).
- [4] A. Di Nardo, M. Di Natale, G. F. Santonastaso, V. G. Tzatchkov, V. H. Alcocer-Yamanaka, “Water network sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths”, *Water Science Technology - Water Supply*, vol. 13, 2013, pp. 951-957.
- [5] A. Di Nardo, M. Di Natale, R. Gargano, C. Giudicianni, R. Greco, G. F. Santonastaso, “Performance of partitioned water distribution networks under spatial-temporal variability of water demand”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 101, 2018, pp. 128-136.
- [6] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs”, *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, 1959, pp. 269-271.
- [7] M. A. Khanesar, M. Teshnehlab, M. A. Shoorehdeli, “A novel binary particle swarm optimization”, *2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, IEEE, 2007*, p. 1-6.