

# Proposta de uma abordagem multiobjetivo para o projeto de dimensionamento de redes de gás natural

Lara T. Cordeiro Ottoni\* Lucas S. Batista\*\*

\* Faculdade Maria Milza, BR 101, 44350-000, Governador Mangabeira, BA, Brasil (e-mail: laratoledocordeiro@gmail.com)

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil (e-mail: lusoba@ufmg.br)

**Abstract:** Natural gas has been increasingly used as an energy source and presents itself as a strong trend for the future. In this context, taking into account the high cost of installing pipelines, the design of these networks requires quality solutions, relating not only financial indicators but also reliability and security in meeting demand. A predefined network topology is assumed, where the pipe diameters define the design variables. Multiobjective algorithms based on the Multiobjective Variable Neighborhood Search (MOVNS) metaheuristic are proposed, which are contrasted with the NSGA-II. In addition, we propose a multi-objective modeling for the problem and a random instance generator defined from the data of the TSPLIB library. The results obtained indicated different characteristics between the estimated Pareto of the compared algorithms. In particular, one algorithm stood out obtaining, in most cases, higher hypervolume values than the other algorithms.

**Resumo:** O gás natural vem sendo usado de modo crescente como fonte de energia e se apresenta como uma forte tendência para o futuro. Nesse contexto, levando-se em consideração o alto custo de instalação de gasodutos, o projeto dessas redes requer soluções de qualidade, relacionando não apenas indicadores financeiros mas também de confiabilidade e segurança quanto ao atendimento da demanda. Assume-se uma topologia de rede pré-definida, onde os diâmetros das tubulações definem as variáveis de projeto. Propõe-se algoritmos multiobjetivo baseados na metaheurística Multiobjective Variable Neighborhood Search (MOVNS), os quais são contrastados com o NSGA-II. Além disso, propõe-se uma modelagem multiobjetivo para o problema e um gerador aleatório de instância definidas a partir dos dados da biblioteca TSPLIB. Os resultados obtidos indicaram diferentes características entre as fronteiras Pareto estimadas pelos algoritmos comparados. Em especial um algoritmo se destacou obtendo, na maioria das vezes, valores de hipervolume maiores que os outros algoritmos.

*Keywords:* Multiobjective optimization; MOVNS; NSGA-II; natural gas networks.

*Palavras-chaves:* Otimização multiobjetivo; MOVNS; NSGA-II; redes de gás natural.

## 1. INTRODUÇÃO

O gás natural é uma fonte de energia essencial para o futuro. Os seus múltiplos benefícios incluem baixas emissões de gases de efeito estufa e custos de capital relativamente reduzidos, o que torna sua posição competitiva na maioria dos setores entre outras fontes de energia (Natural-Gas.Org., 2020). As projeções globais nos níveis de reservas de gás natural também são uma indicação clara do papel cada vez mais importante que o gás natural desempenhará para apoiar o crescimento nos mercados no futuro.

As tendências globais do gás natural podem diferir ligeiramente entre diferentes relatórios fornecidos por uma agência federal e outra. No entanto, o resultado recorrente em todos os estudos é que o consumo, a produção, as reservas e as dependências de gás natural continuarão a aumentar constantemente no futuro previsível (Ríos-

Mercado and Borraz-Sánchez, 2015). Tais expectativas crescentes podem implicar a necessidade de ferramentas de otimização e suporte à tomada de decisão sofisticadas capazes de lidar com projetos maiores e mais complexos em campos nacionais e internacionais.

Existem essencialmente três tipos principais de sistemas de tubulações de gás ao longo das linhas de transporte, variando em diâmetro (100 a 1220 mm): sistemas de coleta, sistemas de transmissão e sistemas de distribuição (Cheboub et al., 2009). Os sistemas de coleta de gasodutos reúnem gás natural bruto de poços de produção. Os sistemas de transmissão de gasodutos transportam gás natural em milhares de quilômetros ao redor do mundo para levar gás natural das usinas de pré-processamento ou instalações de armazenamento para sistemas de distribuição. Os sistemas de distribuição de gasodutos podem ser encontrados em

idades e comunidades e visam distribuir gás natural para casas e empresas.

Existem diversas pesquisas no âmbito das indústrias de distribuição de gás. Tradicionalmente, a pesquisa sobre o dimensionamento de dutos de uma rede de gás é focada principalmente na otimização do custo de instalação da rede para sistemas de distribuição. Neste contexto, existem na literatura diversos trabalhos tratando o problema via programação dinâmica (Rothfarb et al., 1970), programação linear (Hansen et al., 1991), algoritmo genético (Simpson et al., 1994; El-Mahdy et al., 2010; Goldbarg et al., 2004), algoritmo de otimização por colônia de formigas (Zecchin et al., 2006). Entretanto, esses estudos são limitados, pois visam apenas a minimização de custo da rede, desconsiderando aspectos relevantes de projeto, tais como a pressão mínima da rede, a confiabilidade e robustez. Em Cordeiro and Batista (2018) utiliza-se um algoritmo VNS para minimizar o custo de instalação da rede, porém, adicionalmente é realizada uma análise multicritério levando em consideração a pressão mínima, a taxa de factibilidade, o custo médio de falhas e a sensibilidade da rede projetada. De forma geral, esta análise possibilitou uma tomada de decisão mais adequada e assertiva.

Este trabalho apresenta-se como uma extensão do artigo de Cordeiro and Batista (2018), no qual se propõe uma comparação entre ferramentas de otimização multiobjetivo dedicada ao projeto do dimensionamento de redes de gás. Diferentemente do algoritmo mono-objetivo, as ferramentas de otimização multiobjetivo utilizadas são capazes de estimar soluções considerando simultaneamente a minimização do custo de instalação da rede e também a maximização da pressão mínima permitida. Além disso, com a otimização multiobjetivo é possível obter não apenas uma solução, mas um conjunto de soluções que atenda aos requisitos do problema abordado. Outras contribuições deste trabalho são uma modelagem multiobjetivo para o problema e um gerador aleatório de instâncias definidas a partir dos dados da biblioteca TSPLIB. Os resultados obtidos indicaram diferentes características entre as fronteiras Pareto estimadas pelos algoritmos comparados. Em especial um algoritmo se destacou obtendo, na maioria das vezes, valores de hipervolume maiores que os outros algoritmos.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 são definidos aspectos teóricos do problema abordado, bem como a modelagem proposta. Já a seção 3, detalha a abordagem de solução proposta. A seção 4, por sua vez, apresenta o planejamento experimental. Na seção 5 são apresentados os resultados obtidos. Finalmente, na seção 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2. DIMENSIONAMENTO DE REDES DE GÁS NATURAL

O projeto de dimensionamento de uma rede de gás natural consiste principalmente em duas etapas: hidráulica e mecânica. A parte hidráulica do problema envolve questões como: a demanda a ser atendida, a topologia da rede, os critérios de pressão máxima e mínima para a operação adequada da rede, a vazão dos consumidores e as características do gás (da Silva, 2008). A parte mecânica, por sua vez, envolve problemas como: a especificação do material

e a espessura da parede dos dutos adequada para resistir a pressão interna e externa (da Silva, 2008).

O problema abordado neste trabalho envolverá o dimensionamento de uma rede de gás natural na etapa de construção hidráulica, assumindo-se que a fase mecânica já tenha sido concluída. Para isso, é necessário definir a topologia da rede e seus pontos de demanda.

O próximo passo para o dimensionamento de uma rede de gás natural é a escolha dos dutos que irão compor a rede. Para essa escolha há pontos importantes que devem ser levados em consideração. De forma geral, quanto maior o diâmetro de um duto, maior é a quantidade de gás que poderá ser transportada por ele; desta forma a rede consegue atender de maneira segura as demandas existentes (de Castro, 2004). Porém os diâmetros dos dutos existentes no mercado são pré-definidos e o seu custo é proporcional a sua dimensão. Portanto, geralmente, redes robustas são mais caras.

Desta forma, surge o interesse de abordar o projeto de uma rede de gás natural como um problema de otimização combinatória multiobjetivo, onde se deseja minimizar o custo de instalação e maximizar a segurança da rede, o que pode ser obtido via maximização da pressão mínima nos nós da rede. As restrições desse problema exigem que os diâmetros das tubulações sejam suficientes para atender a demanda necessária, de forma que em cada ponto interno da rede seja disponibilizada uma pressão mínima. A satisfação das restrições do problema pode ser verificada através da resolução de equações não lineares de fluxo de gás na rede.

### 2.1 Formulação do Problema de Otimização Proposto

O problema de otimização considerado neste trabalho pretende definir um conjunto de dutos que irão compor a rede, a fim de minimizar o custo de instalação e maximizar a pressão mínima da rede. Os tipos de dutos considerados neste projeto foram selecionados de acordo com os disponíveis no mercado, e seu custo é proporcional ao seu diâmetro e comprimento.

Defini-se o problema como:

$$\min_x F_1(x) = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} L_i C_k x_{ik} \quad (1a)$$

$$\max_x F_2(x) = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} P_j(x) \quad (1b)$$

sujeito a:

$$P_j(x) \geq P_{min}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m. \quad k = 1, \dots, |K|. \quad (3)$$

em que  $K$  é o conjunto de tipos de diâmetros disponíveis no mercado;  $m$  é o número de dutos;  $n$  é o número de nós internos de demanda da rede;  $I$  o conjunto de dutos pré-definidos na rede;  $L_i$  o comprimento do  $i$ -ésimo duto da rede;  $C_k$  o custo por unidade de comprimento do  $k$ -ésimo tipo de diâmetro;  $P_j$  a pressão obtida no  $j$ -ésimo nó da rede;  $P_{min}$  a pressão mínima requerida;  $x_{ik}$  uma variável binária, sendo 1 se o  $k$ -ésimo diâmetro é atribuído ao duto  $i$ , e 0 caso contrário.

As Equações (1a) e (1b) referem-se ao problema multiobjetivo de minimização do custo e maximização da pressão mínima, respectivamente. A Equação (2) expressa as restrições de pressão mínima do problema, que podem ser verificadas através da resolução de equações não lineares de fluxo de gás na rede, de acordo com a Equação (4) (Nielsen, 1989):

$$\Delta p_i(x) = \left( \frac{18.43}{0.9} \right) \left( \frac{L_i |q_i(x)|^{0.854} q_i(x)}{D_i(x)^{4.854}} \right), \quad i = 1, \dots, m. \quad (4)$$

em que  $q_i$  é a taxa de fluxo e  $D_i$  é o diâmetro do  $i$ -ésimo duto da rede.

## 2.2 Função de Avaliação Proposta

O problema de otimização multiobjetivo irrestrito está representado em (5a) e (5b), onde a restrição do problema é tratada via uma função de penalidade:

$$\min_x F_1(x) = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} L_i C_k x_{ik} + \eta(x) (C_{max} - C_{min}) \sum_{i \in I} L_i \quad (5a)$$

$$\min_x F_2(x) = - \min_{j \in \{1, \dots, n\}} P_j(x) + \eta(x) (C_{max} - C_{min}) \sum_{i \in I} L_i \quad (5b)$$

em que  $\eta(x)$  é o número de nós da solução  $x$  que violam a pressão mínima aceitável;  $C_{max}$  e  $C_{min}$  são o custo, por unidade de comprimento, do maior e menor diâmetro disponíveis, respectivamente.

## 3. ABORDAGEM PROPOSTA

Nesta pesquisa utiliza-se uma versão multiobjetivo do algoritmo Variable Neighborhood Search (VNS) apresentado por Mladenović and Hansen (1997). Este método baseia-se na mudança sistemática de vizinhança enquanto se investiga soluções no espaço de busca. Neste trabalho, explora-se um algoritmo recente, chamado MOVNS, proposto por Duarte et al. (2015) especificamente para problemas combinatórios multiobjetivo.

O MOVNS apresenta algumas variações como: reduced VNS (RVNS), general VNS (GVNS) e variable neighborhood descent (VND) (Duarte et al., 2015). Para a realização deste trabalho foram utilizados os algoritmos MORVNS, MOGVNS e MOVND discutidos em Duarte et al. (2015). Todas as adaptações propostas neste artigo são discutidas a seguir.

### 3.1 Solução Inicial

A inicialização de uma solução factível para os algoritmos MORVNS e MOGVNS foi obtida a partir de uma heurística construtiva. A construção desta solução inicial segue o passo a passo a seguir:

- (1) Inicia-se uma rede com todos os dutos iguais ao menor diâmetro disponível, tendo assim a solução mais barata possível. O algoritmo se encerra apenas

quando uma solução factível for encontrada ou um critério de estagnação for alcançado.

- (2) Detecta-se quais nós estão violando a restrição de pressão mínima e desses é selecionado uma porcentagem de 20% dos mesmos.
- (3) Gera-se novas soluções aumentando em uma unidade o diâmetro dos dutos conectados aos nós selecionados no passo (2). Essas perturbações visam construir soluções cujas violações de pressão mínima nos nós sejam menores.
- (4) Verifica-se a solução com menor valor de função objetivo  $F_2$  e caso seja melhor que a solução incumbente e viável, o algoritmo é encerrado; caso contrário, o processo retorna ao passo (2) e a construção iterativa continua.

A melhor solução obtida é retornada no final do algoritmo.

### 3.2 Estruturas de Vizinhanças

As vizinhanças propostas neste trabalho são específicas para as características do problema. Devido a sensibilidade das soluções candidatas, pequenas alterações em sua estrutura podem alterar seu custo em grande escala. Portanto, optou-se por estruturas de vizinhança com perturbações pequenas. As três estruturas de vizinhança implementadas em sequencia são:

- Decremento ou incremento do diâmetro de um duto aleatório para o próximo valor disponível, considerando-se a mesma probabilidade de ocorrência. Caso o duto selecionado esteja associado ao maior diâmetro possível, este é decrementado para o próximo diâmetro disponível. Por outro lado, se o duto selecionado estiver associado ao menor diâmetro possível, este é incrementado para o próximo valor viável.
- Troca dos diâmetros de dois dutos aleatórios vizinhos, i.e., conectados a um mesmo nó da rede.
- Troca dos diâmetros de dois dutos aleatórios quaisquer da rede.

### 3.3 Gerador de Instâncias

Uma das contribuições deste trabalho é a proposta de um gerador de instâncias baseado no conjunto de dados da biblioteca TSPLIB (Reinelt, 1991). Esse gerador de instâncias baseia-se nos seguintes passos:

- (1) Seleciona-se uma instância a partir da biblioteca TSPLIB. Essa instância é representada por um conjunto de vetores no plano cartesiano.
- (2) Obtém-se a árvore geradora mínima da instância selecionada por meio do algoritmo de Kruskal (Kruskal, 1956).
- (3) Identificam-se os nós folha, i.e., conectados a um único duto, e os conecta a outros dois ou três nós vizinhos arbitrários, evitando-se a interseção entre dutos. Esta operação visa a definição de uma rede em malha.
- (4) Define-se, arbitrariamente, entre 2 e 5% dos nós da rede como nós fonte.
- (5) Elaborar-se a matriz de incidência da instância.
- (6) Gera-se aleatoriamente os parâmetros da rede. A demanda de cada nó interno é sorteada entre 10000 e 15000 ( $m^3/h$ ). Entretanto, existe uma probabilidade

de 5% de que cada nó seja apenas de transbordo. Os demais dados da rede, tais como a pressão mínima exigida, a pressão nos nós fonte, os diâmetros disponíveis e os custos relacionados são os mesmos adotados em El-Mahdy et al. (2010) e em Cordeiro and Batista (2018).

### 3.4 MO-NeighborhoodChange\* e MO-Improvement\*

Os métodos MO-NeighborhoodChange e MO-Improvement propostos por Duarte et al. (2015), assumem que se uma nova solução gerada não é dominada por nenhuma das soluções do arquivo, então essa pode contribuir com a qualidade do mesmo. Entretanto, devido ao problema de deterioração frequentemente observado em processos de atualização/truncagem do conjunto de soluções não-dominadas (Deb, 2001), todas as soluções não-dominadas serão aceitas, mesmo que estas não contribuam de fato para a melhora do arquivo. Essa limitação pode conduzir esses métodos a um *loop*, comprometendo a convergência da abordagem.

Nesse contexto, neste trabalho propõe-se uma estratégia distinta para a verificação da possibilidade de melhora do arquivo. De forma geral, o algoritmo MO-Improvement sugerirá a possibilidade de melhora do arquivo corrente, somente se uma nova solução gerada atender a dois critérios básicos: i) ser não-dominada em relação às demais soluções do arquivo e ii) contribuir com a diversidade deste arquivo. Caso o arquivo já esteja cheio, a verificação será realizada considerando-se a inclusão da nova solução no arquivo e remoção do vetor de menor *crowding distance* (Deb et al., 2002). Este novo método é apresentado nas Algoritmos 1 e 2. Nestes algoritmos,  $E$  e  $E'$  são conjuntos de soluções a serem comparados,  $N$  é o número máximo de soluções que podem existir no arquivo  $E$ ,  $Dominated(x, E)$  é uma função que verifica se a solução  $x \in E'$  é dominada por pelo menos um dos pontos de  $E$ .

De forma complementar, o arquivo e a estrutura de vizinhança serão atualizados no método MO-NeighborhoodChange de acordo com o indicador de qualidade hipervolume (HV) (Zitzler and Thiele, 1999). Assim sendo, caso uma nova solução gerada melhore o HV do arquivo, então retorna-se este arquivo atualizado e mantém-se a estrutura de vizinhança  $k = 1$ ; caso contrário, mantém-se o arquivo original e considera-se a próxima estrutura de vizinhança,  $k = k + 1$ . O mesmo se aplica também ao método MO-ObjectiveChange. O pseudo-código desta nova estratégia é apresentado nos Algoritmos 3 e 4.

Estas abordagens propostas são nomeadas MO-Improvement\* e MO-NeighborhoodChange\*, as quais são usadas neste artigo em substituição às heurísticas originais.

## 4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Todos os algoritmos utilizados no experimento foram desenvolvidos em MATLAB R2014b e executados em um computador Ubuntu 16.04 LTS de 8GB de RAM. A análise estatística dos resultados foi realizada no R 3.5.3 (R Core Team, 2019).

As instâncias utilizadas foram geradas a partir do gerador de instâncias desenvolvido neste trabalho. Para a realização dos testes foram desenvolvidas 9 instâncias para

---

### Algoritmo 1: MO-Improvement\*

---

**Entrada:**  $E, E'$

```

1 para  $x \in E'$  faça
2   se  $x \notin E \wedge \neg Dominated(x, E)$  então
3     se  $|E| < N \parallel improveNDSets(x, E)$ 
4       então
5         retorna true;
6     fim
7 fim
8 retorna false;
```

---



---

### Algoritmo 2: ImproveNDSets

---

**Entrada:**  $x, E$

```

1  $E = E \cup \{x\}$ ;
2  $c = CrowdingDistanceAssignment(E)$ ;
3  $y = \min_{y \in E} c(y)$ ;
4 se  $x \neq y$  então
5   retorna true;
6 fim
7 retorna false;
```

---



---

### Algoritmo 3: MO-NeighborhoodChange\*

---

**Entrada:**  $E, E', k$

```

1 se MO-Improvement*( $E, E'$ ) então
2    $A = Update(E, E')$ ;
3   se improveHV( $E, A$ ) então
4      $E = A$ ;
5      $k = 1$ ;
6   fim
7 senão
8    $k = k + 1$ ;
9   fim
10 fim
11 senão
12    $k = k + 1$ ;
13 fim
14 retorna  $E, k$ ;
```

---



---

### Algoritmo 4: ImproveHV

---

**Entrada:**  $E, A$

```

1 se hypervolume( $A$ ) > hypervolume( $E$ ) então
2   retorna true;
3 fim
4 senão
5   retorna false;
6 fim
```

---

o problema: Berlin52a, Berlin52b, Eil51a, Eil51b, Eil76a, Eil76b, St70a, St70b e Rd100. Em todos os experimentos foram coletadas 5 execuções dos algoritmos em cada instância.

Os algoritmos multiobjetivo comparados neste trabalho são: MORVNS, MOGVNS, NSGA-IIa e NSGA-IIb. O

algoritmo NSGA-II utilizado possui muitas similaridades com o proposto em Deb et al. (2002), porém com operadores de variações diferentes, conforme definidos em El-Mahdy et al. (2010). Os algoritmos NSGA-IIa e NSGA-IIb se diferem apenas com relação ao critério de parada. O critério de parada do NSGA-IIa é igual ao número de avaliações de função (*naf*) realizadas pelo MORVNS e o critério de parada do NSGA-IIb é igual ao *naf* do MOGVNS. Nos algoritmos MORVNS e MOGVNS, o critério de parada baseado em tempo de execução foi substituído por um determinado número de iterações. Nesse contexto, considerou-se 30 iterações para o MORVNS e 3 para o MOGVNS. O número de avaliações de função realizadas foi usado como critério de parada dos métodos baseados no NSGA-II, conforme discutido anteriormente.

Cabe ressaltar que o número de avaliações de função realizadas pelo MORVNS é significativamente menor, já que o mesmo não realiza a busca local considerada no MOGVNS. Logo, para uma comparação justa entre os métodos, considera-se os dois grupos de algoritmos: (MOGVNS e NSGA-IIb) e (MORVNS e NSGA-IIa).

## 5. RESULTADOS

Os parâmetros utilizados nos algoritmos NSGA-II *a* e *b* são compatíveis com os utilizados pelo algoritmo genético mono-objetivo proposto em El-Mahdy et al. (2010). O algoritmo utiliza variáveis binárias de 3 bits e as probabilidades de cruzamento e mutação são de 100% e 5%, respectivamente. Na seleção utilizou-se torneio binário.

Para comparar os algoritmos MORVNS, MOGVNS, NSGA-IIa e NSGA-IIb, foram geradas 9 instâncias a partir do gerador de instâncias (seção 3.3). A Figura 1 mostra uma das redes geradas a partir da instância Berlin52b (Reinelt, 1991). Foram executadas 5 repetições para cada instância. A Tabela 1 mostra a média e o desvio padrão do hipervolume(HV) para cada instância.

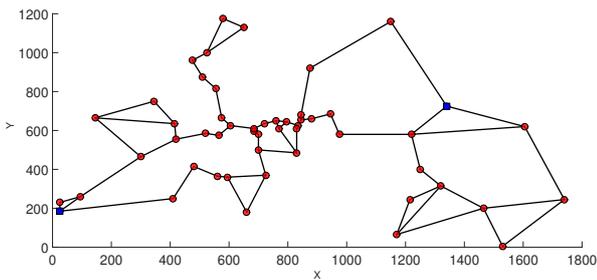
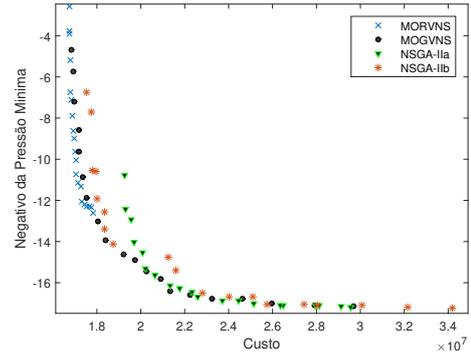
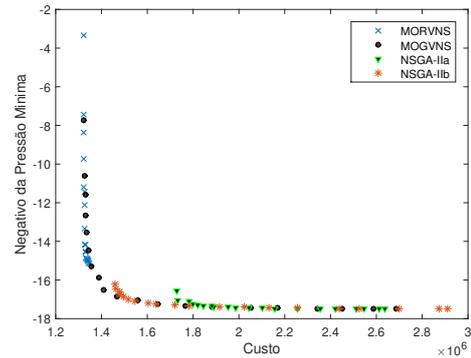


Figura 1. Rede Berlin52b: na imagem os círculos são os nós de demanda, os quadrados são os nós fontes e as arestas são os dutos da rede

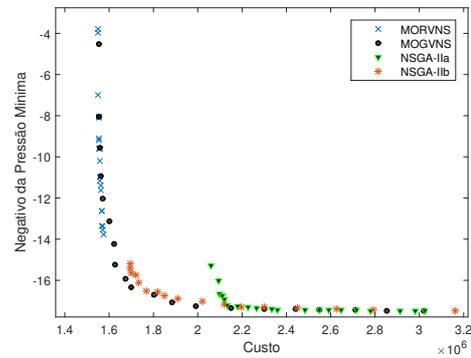
Pela Tabela 1 é possível observar que o algoritmo MOGVNS apresenta, na maioria das vezes, o maior hipervolume calculado. A Figura 2 mostra exemplos das fronteiras Pareto estimadas para as instâncias Berlin52a, Eil76b, Eil70b e Rd100. A partir desses resultados, é possível notar que o algoritmo MOGVNS consegue obter fronteiras com melhor cobertura. O MORVNS tende a priorizar resultados com baixo custo, mas com pressões próximas da mínima permitida. Já o NSGA-IIa, ao contrário do MORVNS, tende a mapear soluções com custo mais



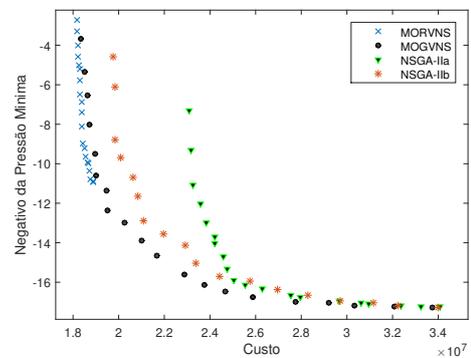
(a) Resultado para Berlin52a



(b) Resultado para Eil76b



(c) Resultado para Eil70b



(d) Resultado para Rd100

Figura 2. Exemplos de fronteiras obtidas pelos algoritmos multiobjetivo. A unidade de pressão informada nos gráficos é dada em bar e o custo em dólares.

Tabela 1. Resultados comparativos entre os algoritmos. Em negrito estão os melhores resultados das médias do hipervolume (HV)

Instâncias	MORVNS	MOGVNS	NSGA-IIa	NSGA-IIb
Berlin52a	0.9311(0.0470)	<b>1.1093(0.0170)</b>	1.0309(0.0200)	1.0969(0.0064)
Berlin52b	0.9584(0.0379)	1.0678(0.0058)	1.0041(0.0136)	<b>1.0688(0.0051)</b>
Eil51a	1.0287(0.0190)	<b>1.1819(0.0025)</b>	0.9970(0.0143)	1.1500(0.0033)
Eil51b	1.0520(0.0388)	<b>1.1801(0.0020)</b>	0.9997(0.0274)	1.1431(0.0052)
Eil76a	0.9009(0.0327)	<b>1.1558(0.0019)</b>	0.9615(0.0212)	1.1131(0.0034)
Eil76b	1.0548(0.0183)	<b>1.1896(0.0005)</b>	0.9361(0.0167)	1.1316(0.0091)
St70a	0.8650(0.0658)	<b>1.1449(0.0059)</b>	1.0921(0.0178)	1.0921(0.0034)
St70b	0.9410(0.0161)	<b>1.1760(0.0054)</b>	0.9621(0.0206)	1.1243(0.0053)
Rd100	0.7624 (0.0325)	<b>1.0971 (0.0063)</b>	0.8922(0.0140)	1.0223(0.0081)

elevado, porém com pressão mínima mais alta. O NSGA-IIb obteve soluções com cobertura promissora, porém de forma irregular, com diversos espaços entre as soluções.

Para uma comparação mais elaborada dos algoritmos realizou-se uma análise estatística para verificar se existe diferença significativa entre eles em termos do hipervolume. Foi utilizado o teste de análise de variância (ANOVA) para verificar se existe diferença estatística entre os desempenhos dos algoritmos (significância de 0.05). A ANOVA é aplicada para testar a hipótese nula ( $H_0$ ) de ausência de diferença no desempenho dos algoritmos contra a hipótese alternativa ( $H_1$ ) de que pelo menos um algoritmo apresenta diferença em relação a um outro algoritmo (Montgomery, 2017):

$$\begin{cases} H_0 : \alpha_i = 0 \quad \forall i \\ H_1 : \alpha_i \neq 0 \quad \text{para qualquer } i \end{cases}$$

Os resultados da ANOVA indicaram que existem diferenças entre os métodos, i.e., com o  $p$ -valor  $< 0.05$ . As premissas da normalidade e da homocedasticidade foram respeitadas; utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Bartlett, respectivamente.

Para identificar as médias dos algoritmos que são estatisticamente diferentes entre si (Campelo, 2018) foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey (Montgomery, 2017). Este método pode ser executado com a ANOVA.

Os resultados obtidos pelo teste de Tukey mostraram que para as instâncias Berlin52a, Berlin52b, Eil51b e St70a, os algoritmos MOGVNS e NSGA-IIb apresentam desempenhos estatisticamente diferentes em relação aos métodos MORVNS e NSGA-IIa. Para as instâncias Eil51a, Eil76a, Eil76b, St70b e Rd100 observa-se desempenhos estatisticamente diferentes em todos os algoritmos.

O MOGVNS obteve a maior média do hipervolume na maioria das instâncias, conforme mostrado na Tabela 1. Este fato pode ser observado também por meio da Figura 3.

Com relação ao tempo computacional dos algoritmos, o MORVNS e NSGA-IIa exigem um tempo de execução similar. Da mesma forma, foi possível notar essa similaridade entre os algoritmos MOGVNS e NSGA-IIb. Essa aproximação se deve ao mesmo critério de parada desses pares de algoritmos, ou seja, o número de avaliações de função.

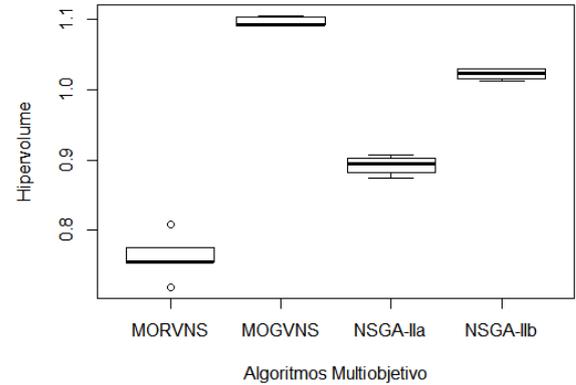


Figura 3. Boxplot da medida de hipervolume obtido pelos algoritmos

No entanto, a diferença de tempo entre esses dois grupos é elevada. Esta diferença pode ser justificada pelo aumento do número de avaliações de funções objetivo, o que para o problema em questão é computacionalmente caro.

Entretanto, devido a qualidade das soluções apontadas pelos algoritmos MOGVNS e NSGA-IIb, julga-se que o tempo em questão não seja tão relevante quanto a qualidade das soluções obtidas, visto que não é necessária uma solução em um curto intervalo de tempo, mas sim um projeto eficiente. De forma geral, é de sumária importância que as soluções sejam boas o suficiente para a economia de milhares de dólares e também para o atendimento seguro da demanda da rede.

Assim sendo, o MOGVNS apresentou resultados com baixo custo e elevada pressão mínima em comparação com os algoritmos MORVNS, NSGA-IIa e NSGA-IIb.

## 6. CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo desenvolver uma ferramenta de otimização multiobjetivo para o problema de dimensionamento de redes de gás natural. Considerou-se a minimização do custo de instalação da rede e a maximização da pressão mínima nos nós da rede, visando o atendimento da demanda de forma segura.

De forma geral, este trabalho traz ganhos a comunidade acadêmica envolvida com a otimização de redes de distribuição de gás natural. Acredita-se que são contribuições originais deste trabalho: a modelagem multiobjetivo proposta para o problema; o VNS multiobjetivo dedicado ao problema, incluindo uma heurística construtiva inteligente e um gerador aleatório de instâncias para o problema, baseado no banco de dados da biblioteca TSPLIB.

A heurística construtiva proposta para a definição de uma solução inicial se mostrou muito eficiente. Assim, os algoritmos MORVNS e MOGVNS já partiam de soluções boas. Esse fato tende a favorecer a busca local, uma vez que a solução inicial possivelmente já se encontra próxima de ótimos locais promissores.

A partir de uma análise descritiva dos valores dos hipervolumes obtidos pelos algoritmos MORVNS, MOGVNS, NSGA-IIa e NSGA-IIb (Tabela 1), observou-se que na maioria das instâncias o MOGVNS obteve o maior valor de hipervolume. O teste ANOVA indicou que existe diferenças entre os algoritmos investigados. O teste de Tukey mostrou que para 5 das instâncias utilizadas os algoritmos são estatisticamente diferentes entre si; além disso, mostrou que nas outras 4 instâncias o MOGVNS e NSGA-IIb são estatisticamente diferentes dos algoritmos MORVNS e NSGA-IIa. A análise realizada com relação ao custo computacional mostra que devido a qualidade das soluções obtidas pelo algoritmo MOGVNS o mesmo apresenta o melhor compromisso dentre os algoritmos investigados. Embora seja computacionalmente mais caro, o algoritmo MOGVNS consegue obter boas soluções considerando o custo computacional e a pressão mínima.

Por fim, este procedimento, apesar de ser igualmente, ou ainda mais, capaz de encontrar soluções econômicas e robustas para o problema do dimensionamento de redes de gás, não implica, em absoluto, substituir projetistas humanos de gasodutos. Muito pelo contrário, seu principal objetivo é fornecer aos interessados um conjunto de soluções bom e variado, deixando a escolha real para projetistas e engenheiros. Vale enfatizar também que muitas partes do algoritmo são altamente personalizáveis, sendo, portanto, tão boas quanto as pessoas envolvidas. Assim, tanto o julgamento humano quanto a parte algorítmica são indissociáveis da qualidade do procedimento em si.

Há muitas extensões em potencial para o que foi feito neste trabalho. Para trabalhos de continuidade sugere-se o desenvolvimento de um módulo adicional para suporte a tomada de decisão multicritério, a qual levaria em consideração não apenas as duas funções objetivo abordadas na otimização, mas também critérios adicionais como sensibilidade da rede, factibilidade, custo médio de falhas. Vale mencionar também aplicação da abordagem em problemas reais e em instâncias maiores.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio das agências de fomento brasileiras: CAPES, FAPEMIG e CNPq.

## REFERÊNCIAS

Campelo, F. (2018). Lecture notes on design and analysis of experiments. <http://git.io/v3Kh8>. Version 2.12; Creative Commons BY-NC-SA 4.0.

- Chebouba, A., Yalaoui, F., Smati, A., Amodeo, L., Younsi, K., and Tairi, A. (2009). Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization. *Computers & Operations Research*, 36(6), 1916–1923.
- Cordeiro, L.T. and Batista, L.S. (2018). Análise multicritério do projeto de dimensionamento de tubulações de redes de gás natural sob condições de incerteza da evolução da carga. *XIII SIMMEC - Simpósio de Mecânica Computacional*, 1–14.
- da Silva, W.C. (2008). *Um Estudo do Problema de Dimensionamento de Dutos de Gás*. Master's thesis, COOPE/UFRJ.
- de Castro, M.P. (2004). *Algoritmos Evolucionários para o Problema de Dimensionamento dos Dutos de uma Rede Urbana de Distribuição de Gás Natural*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal RN.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- Duarte, A., Pantrigo, J.J., Pardo, E.G., and Mladenovic, N. (2015). Multi-objective variable neighborhood search: an application to combinatorial optimization problems. *Journal of Global Optimization*, 63(3), 515–536.
- El-Mahdy, O.F.M., Ahmed, M.E.H., and Metwalli, S. (2010). Computer aided optimization of natural gas pipe networks using genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 45(10), 1141–1150.
- Goldberg, E.F.G., de Castro, M.P., Goldberg, M.C., and da Costa, W.E. (2004). O problema de otimização dos diâmetros de dutos de redes urbanas de gás natural: Uma abordagem evolucionária. *XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 1872–1883.
- Hansen, C.T., Madsen, K., and Nielsen, H.B. (1991). Optimization of pipe networks. *Mathematical Programming*, 52(1-3), 45–58.
- Kruskal, J.B. (1956). On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 7(1), 48–50.
- Mladenović, N. and Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11), 1097–1100.
- Montgomery, D.C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons, ninth edition.
- Nielsen, H.B. (1989). Methods for analyzing pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(2), 139–157.
- R Core Team (2019). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>.
- Reinelt, G. (1991). Tsplib a traveling salesman problem library. *ORSA journal on computing*, 3(4), 376–384.
- Ríos-Mercado, R.Z. and Borraz-Sánchez, C. (2015). Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review. *Applied Energy*, 147, 536–555.
- Rothfarb, B., Frank, H., Rosenbaum, D., Steiglitz, K., and Kleitman, D.J. (1970). Optimal design of offshore natural-gas pipeline systems. *Operations research*, 18(6), 992–1020.
- Simpson, A.R., Dandy, G.C., and Murphy, L.J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of water resources planning and management*, 120(4), 423–443.
- Zecchin, A.C., Simpson, A.R., Maier, H.R., Leonard, M., Roberts, A.J., and Berrisford, M.J. (2006). Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation. *Mathematical and computer modelling*, 44(5-6), 451–468.
- Zitzler, E. and Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257–271.