

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1129

**PROJETO MULTICRITÉRIO DO DIMENSIONAMENTO DE REDES DE GÁS  
NATURAL SOB CONDIÇÕES DE INCERTEZA DA EVOLUÇÃO DA  
CARGA**

**Lara Toledo Cordeiro**

DATA DA DEFESA: 12/07/2019

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**PROJETO MULTICRITÉRIO DO DIMENSIONAMENTO DE  
REDES DE GÁS NATURAL SOB CONDIÇÕES DE INCERTEZA  
DA EVOLUÇÃO DA CARGA**

Lara Toledo Cordeiro

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Lucas de Souza Batista

Belo Horizonte - MG

Julho de 2019

C794p

Cordeiro, Lara Toledo.

Projeto multicritério do dimensionamento de redes de gás natural sob condições de incerteza da evolução da carga [recurso eletrônico] / Lara Toledo Cordeiro. – 2019.

1 recurso online (xiv, 60 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Lucas de Souza Batista.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 57-60.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Gás natural - Teses. 3. Otimização multiobjetivo - Teses. I. Batista, Lucas de Souza. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

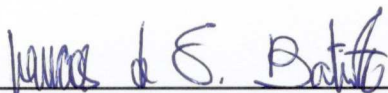
**"Projeto Multicritério do Dimensionamento de Redes de Gás Natural Sob Condições de Incerteza da Evolução da Carga"**

**Lara Toledo Cordeiro**

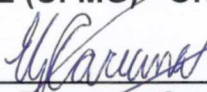
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de julho de 2019.

Por:



Prof. Dr. Lucas de Souza Batista  
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Eduardo Gontijo Carrano  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. André Luiz Maravilha Silva  
Departamento de Informática, Gestão e Design (CEFET-MG)





*“Dedico aos meus pais, Janaína e Rodrigo”*

—

## 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. Dessa forma, esta dissertação propõe uma abordagem para o projeto de redes de gás natural sob condições de incerteza da evolução da carga ao longo de um horizonte de tempo. 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 considerando-se um conjunto de instâncias definidas a partir dos dados da biblioteca TSPLIB. A metodologia proposta é aplicada a um estudo de caso real, e os resultados são comparados aos obtidos por três engenheiros de uma companhia de gás, com seis anos de experiência em média. As soluções são comparadas a partir de uma análise de dominância, considerando-se os critérios: custo de instalação, pressão mínima, taxa de factibilidade, custo médio de falha e sensibilidade. Os resultados indicam soluções relativamente distintas daquelas obtidos pelos engenheiros, apresentando redes mais robustas e seguras sob condições de incertezas de evolução da carga.

## Abstract

Natural gas has been increasingly used as a source of energy 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 relation to demand. Thus, this thesis proposes an approach for the design of natural gas networks under conditions of uncertainty of the evolution of the load over a time horizon. A predefined network topology is assumed, where the pipe diameters define the design variables. We propose multiobjective algorithms based on the Multiobjective Variable Neighborhood Search (MOVNS), which are contrasted with the NSGA-II considering a set of instances defined from the TSPLIB library data. The proposed methodology is applied to a real case study, and the results are compared to those obtained by three engineers of a gas company with six years of experience on average. The solutions are compared from a dominance analysis, considering the criteria: installation cost, minimum pressure, feasibility rate, average cost of failure and sensitivity. The results indicate solutions relatively different from those obtained by the engineers, presenting more robust and safe networks under conditions of uncertainties of load evolution.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, quem me deu forças para persistir neste caminho todos os dias. Agradeço sinceramente pelas inúmeras portas que foram abertas, e também pelas oportunidades que certamente virão. Agradeço aos meus pais Rodrigo e Janaína, quem sempre me motivaram a lutar pelos meus sonhos; aos meus irmãos, Júlia e João Paulo, e familiares que me apoiaram neste caminho. Agradeço ao meu orientador Lucas S. Batista, quem direcionou meus primeiros passos no campo da otimização. Além de ter se mostrado um amigo, representa um dos maiores responsáveis pela concretização deste trabalho. Sou grata ainda pela amizade do grupo de pesquisa ORCS. Finalmente, agradeço ao meu noivo e amigo André Luiz, que nunca deixou de mostrar seu amor e carinho, sendo sempre companheiro e muito paciente. Agradeço a Capes pelo apoio financeiro, sem o qual esse trabalho não teria sido possível.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Algoritmos</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Apresentação . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Objetivo Geral . . . . .	3
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.3. Contribuições . . . . .	4
1.4. Estrutura do Trabalho . . . . .	4
<b>2. Dimensionamento de Redes de Distribuição de Gás Natural</b>	<b>7</b>
2.1. Caracterização do Problema . . . . .	8
2.2. Definição do Problema de Otimização . . . . .	8
2.2.1. Entradas e Saídas do Problema de Fluxo . . . . .	9
2.2.2. Convenção de sinal e matriz de incidência . . . . .	9
2.2.3. Equações de Continuidade . . . . .	10
2.2.4. Equações de Fluxo . . . . .	10
2.2.5. Formulação Matricial do Problema Não Linear . . . . .	11
2.2.6. Formulação do Problema de Otimização Proposto . . . . .	13
2.3. Revisão do Estado da Arte . . . . .	14
<b>3. Ferramenta Integrada Proposta</b>	<b>19</b>
3.1. Introdução . . . . .	20
3.2. Multi-objective VNS (MOVNS) . . . . .	20
3.2.1. Multi-objective Reduced VNS (MORVNS) . . . . .	20
3.2.2. Multi-objective General VNS (MOGVNS) . . . . .	20

3.2.3. Busca Local: Multi-objective VND (MOVND) . . . . .	21
3.2.4. MO-NeighborhoodChange . . . . .	22
3.2.5. MO-Shake . . . . .	23
3.3. Abordagens Propostas . . . . .	23
3.3.1. Solução Inicial . . . . .	23
3.3.2. Estruturas de Vizinhança . . . . .	24
3.3.3. Gerador de Instâncias . . . . .	26
3.3.4. MO-Improvement* e MO-NeighborhoodChange* . . . . .	26
3.3.5. Análise Multicritério . . . . .	27
<b>4. Resultados</b>	<b>33</b>
4.1. Introdução . . . . .	34
4.2. Planejamento Experimental . . . . .	34
4.3. Resultados das Heurísticas Construtivas . . . . .	35
4.4. Resultados dos Algoritmos Multiobjetivo . . . . .	37
4.5. Estudo de Caso . . . . .	41
4.5.1. Resultados Obtidos pela Abordagem Proposta . . . . .	42
4.6. Discussão Final . . . . .	46
<b>5. Conclusões</b>	<b>47</b>
Conclusões Parciais . . . . .	48
Conclusões Parciais . . . . .	49
<b>A. Estudo de caso</b>	<b>53</b>
<b>Referências</b>	<b>57</b>

# Lista de Figuras

4.1. Tempo de execução das heurísticas construtivas . . . . .	37
4.2. Fronteiras obtidas pelos algoritmos multiobjetivo . . . . .	39
4.3. Boxplot do resultado da instância Rd100a. . . . .	41
4.4. Rede empregada no estudo de caso. Adaptada de El-Mahdy et al. (2010). . . . .	42
4.5. Fronteiras obtidas pelo MOGVNS no estudo de caso . . . . .	44



# Lista de Tabelas

4.1. Resultados das Heurísticas Construtivas. Em negrito estão os melhores resultados de $F_1$ e $F_2$ para cada instância . . . . .	36
4.2. Resultados dos Algoritmos Multiobjetivo. Em negrito estão os melhores resultados das médias do hipervolume (HV) e a média do tempo (em horas). . . . .	38
4.3. Resultados obtidos pela heurística construtiva e os resultados de El-Mahdy et al. (2010). . . . .	43
4.4. Resultados da análise multicritério . . . . .	45
4.5. Soluções de El-Mahdy et al. (2010) avaliadas nos critérios propostos. . . . .	45
A.1. Diâmetros disponíveis no mercado . . . . .	53
A.2. Demanda nos nós interiores $Q$ . . . . .	54
A.3. Pressão nos nós fonte $P$ . . . . .	54
A.4. Comprimento dos Dutos $L$ . . . . .	55



# Lista de Algoritmos

3.1. MORVNS . . . . .	21
3.2. MOGVNS . . . . .	21
3.3. MO-VND . . . . .	22
3.4. Heurística Construtiva . . . . .	25
3.5. MO-Improvement* . . . . .	27
3.6. ImproveNDSet . . . . .	28
3.7. MO-NeighborhoodChange* . . . . .	28
3.8. ImproveHV . . . . .	28



# Capítulo 1.

## Introdução

*“O assunto mais importante do mundo pode ser simplificado até ao ponto em que todos possam apreciá-lo e compreendê-lo. Isso é – ou deveria ser – a mais elevada forma de arte.”*

— Charles Darwin, 1809–1882

## 1.1. Apresentação

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 (NaturalGas.Org., 2018). 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.

O desempenho do gás natural como fonte de energia primária é altamente representativo em três setores específicos de consumo: os setores residencial, industrial e geração elétrica. A maior parte do consumo de gás natural está concentrada nos setores industriais e de geração elétrica, representando 87% do consumo mundial total de gás natural (U.S. Energy Information Administration, 2011).

Existem essencialmente três tipos principais de sistemas de tubulações de gás ao longo das linhas de transporte, variando diâmetro (100 a 1220 mm): sistemas de coleta, sistemas de transmissão e sistemas de distribuição (Chebouba 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 cidades e comunidades e visam distribuir gás natural para casas e empresas.

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 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 linear (Hansen et al.; 1991), programação dinâmica (Rothfarb et al.; 1970),

algoritmo genético (El-Mahdy et al.; 2010; Goldberg et al.; 2004; Simpson et al.; 1994), algoritmo de otimização por colônia de formigas (Mohajeri, Mahdavi and Mahdavi-Amiri; 2012; 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.

Neste sentido, este trabalho propõe uma ferramenta de otimização multiobjetivo dedicada ao projeto do dimensionamento de redes de gás. A ferramenta de otimização utilizada é capaz de estimar soluções considerando simultaneamente a minimização do custo de instalação da rede e também a maximização da pressão mínima permitida. Além disso, propõe-se uma análise multicritério dessas soluções considerando alguns critérios relevantes, tais como taxa de factibilidade, custo médio de falha e sensibilidade. Essa análise multicritério leva em consideração cenários de incerteza da evolução da demanda ao longo de um dado horizonte de tempo, e visa auxiliar no processo de definição de uma solução final adequada ao problema.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta integrada para a otimização multiobjetivo e análise multicritério do problema de dimensionamento de redes de gás natural. Essa ferramenta envolverá uma otimização efetivamente multiobjetivo, considerando-se a minimização do custo de instalação da rede e a maximização da pressão mínima nos nós da rede, visando o atendimento seguro da demanda. A estratégia de suporte à decisão relacionará as funções objetivo anteriores e também três critérios adicionais, i.e., taxa de factibilidade, custo médio de falhas e sensibilidade, os quais levam em consideração cenários de incerteza da evolução da demanda ao longo de um horizonte de tempo determinado.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Propor uma modelagem multiobjetivo para o problema de dimensionamento de redes de gás natural;
- Propor um algoritmo VNS multiobjetivo para a solução do problema em questão;
- Propor uma heurística construtiva, para a geração de uma solução inicial de qualidade, dedicada ao problema;
- Desenvolver uma ferramenta de análise multicritério adequada ao problema, para auxílio à tomada de decisão;
- Contrastar resultados obtidos com aqueles disponíveis na literatura.

### 1.3. Contribuições

O presente trabalho traz ganhos à comunidade acadêmica envolvida com a otimização de redes de distribuição de gás natural. De maneira específica, acredita-se que são contribuições desta dissertação:

- Modelagem multiobjetivo do problema de dimensionamento de redes de distribuição de gás natural;
- VNS multiobjetivo incluindo uma heurística construtiva dedicada ao problema;
- Gerador aleatório de instâncias para o problema, baseado no banco de dados da biblioteca TSPLIB (Reinelt; 1991);
- Estratégia de suporte à tomada de decisão multicritério, envolvendo os critérios: custo de instalação, pressão mínima, taxa de factibilidade, custo médio de falhas e sensibilidade.

### 1.4. Estrutura do Trabalho

Os assuntos discutidos neste trabalho estão organizados conforme mostrado a seguir.

**Capítulo 2 – Dimensionamento de Redes de Distribuição de Gás Natural:** Neste capítulo são relacionadas as principais informações sobre o problema abordado. Apresenta-se também a modelagem matemática proposta para o problema de otimização

multiobjetivo e uma revisão atualizada considerando-se os principais trabalhos do estado da arte.

**Capítulo 3 – Ferramenta Integrada Proposta:** Neste capítulo apresenta-se a ferramenta integrada proposta neste trabalho, envolvendo um algoritmo VNS multiobjetivo dedicado ao problema e uma estratégia de auxílio à tomada de decisão multicritério.

**Capítulo 4 – Resultados:** Neste capítulo apresenta-se o planejamento experimental utilizado e análise dos resultados obtidos, envolvendo avaliação dos algoritmos propostos, tomada de decisão multicritério e comparações com a literatura.

**Capítulo 5 – Conclusão:** Neste capítulo são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho e propostas de continuidade.



## Capítulo 2.

# Dimensionamento de Redes de Distribuição de Gás Natural

*“Um relato honesto se desenrola melhor se o fazem sem rodeios.”*

— William Shakespeare, 1564–1616

## 2.1. Caracterização do Problema

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 (de Castro, 2004).

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 fixos, e o seu custo é proporcional a sua dimensão. Portanto, geralmente, redes robustas são mais caras.

Desta forma, obtém-se um problema de otimização combinatória, onde se deseja minimizar o custo de instalação e maximizar a pressão mínima nos nós de uma 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.

## 2.2. Definição do Problema de Otimização

De forma geral, neste trabalho deseja-se definir um conjunto de dutos que irão compor a rede, a fim de minimizar o custo de instalação. 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.

### 2.2.1. Entradas e Saídas do Problema de Fluxo

O problema de dimensionamento de dutos abordado neste trabalho é referente ao dimensionamento hidráulico para uma topologia pré-definida. A rede é formada por  $n + s$  nós e  $m$  dutos. Os nós  $(1, \dots, n)$  são os nós internos de demanda e os nós  $(n + 1, \dots, n + s)$  são os nós associados às fontes. Cada duto possui um comprimento  $L_i$ .

Dada uma rede com  $s$  nós fontes,  $n$  nós internos e  $m$  dutos, as informações de entrada da rede são: topologia da rede, comprimento de cada duto  $L = [L_1, \dots, L_m](m)$ , diâmetro de cada duto  $D = [D_1, \dots, D_m](mm)$ , demanda nos nós internos  $Q = [Q_1, \dots, Q_n](m^3/h)$ , pressão nos nós das fontes  $P = [P_1, \dots, P_s](bar)$ . A pressão nos nós do sistema de transmissão de gás natural não pode ser menor que a pressão mínima permitida na rede; este parâmetro é uma constante de projeto relacionada ao atendimento de demanda da rede.

As saídas são definidas como: taxa de fluxo nos dutos  $q = [q_1, \dots, q_m](m^3/h)$  e a pressão nos nós internos  $p = [p_1, \dots, p_n](bar)$ .

### 2.2.2. Convenção de sinal e matriz de incidência

Antes de modelar o problema é necessário adotar algumas convenções, como os sinais para direção do fluxo de gás. Para um duto  $i$  conectado aos nós  $j_{i1}$  e  $j_{i2}$ , considera-se que o fluxo é positivo quando a direção do fluxo é do nó  $j_{i2}$  para o nó  $j_{i1}$ . Em outras palavras, quando o fluxo vai do nó com maior índice para o menor.

Para isso é definido a matriz de incidência  $\mathbf{A} \in \Re^{m(n+s)}$ , cujos elementos  $a_{ij}$  são definidos como:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{se } j = j_{i1}, \\ -1, & \text{se } j = j_{i2}, \\ 0, & \text{caso contrário (conexão inexistente)}. \end{cases}$$

Consequentemente, cada linha  $i$  da matriz  $\mathbf{A}$  terá dois elementos diferentes de zero (+1 e -1), e cada coluna  $j$  terá um número de elementos diferentes de zero igual à cardinalidade do nó  $j$ , isto é, número de dutos incidentes em  $j$ .

Para determinar as incógnitas, um sistema de equações será configurado, com base em dois tipos de equações que o problema deve satisfazer: equações de continuidade (que se aplicam a nós) e equações de fluxo (que se aplicam a dutos).

### 2.2.3. Equações de Continuidade

As equações de continuidade expressam matematicamente o requisito de conservação de fluxo em cada nó, ou seja, a quantidade de gás consumida pelo nó deve ser igual ao saldo que flui através dos dutos conectados a ele:

$$Q_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} q_i, \quad j = 1, \dots, n. \quad (2.1)$$

### 2.2.4. Equações de Fluxo

Equações de fluxo modelam a perda de pressão ao longo de tubulações em função do fluxo que passa por elas, e podem ser genericamente modeladas como Nielsen (1989):

$$\Delta p_i = r_i q_i, \quad i = 1, \dots, m. \quad (2.2)$$

em que  $\Delta p_i = p_{j_{i2}}^2 - p_{j_{i1}}^2$  é a queda de pressão entre os nós conectados pelo duto  $i$  e  $r_i$  é a resistência do fluxo no duto  $i$ .

A resistência do fluxo pode ser expressa em termos de  $q_i$ , conforme:

$$r_i = K_i |q_i|^{\alpha-1} \quad (2.3)$$

Os parâmetros específicos que determinam  $K_i$  dependem do regime de pressão da tubulação, que não é o foco deste trabalho. No entanto, seguindo as recomendações de Osiadacz and Pienkosz (1988) e Scucuglia (2006), será adotada a equação Panhandel 'A', indicada para redes de alta pressão ( $> 7$  bar):

$$K_i = 18.43 \left( \frac{L_i}{D_i^\beta E_i^2} \right) \quad (2.4)$$

em que  $E_i$  é o fator de eficiência do duto  $i$ . Para simplificar, todos os dutos são considerados com um mesmo fator  $E$ . Os valores típicos de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $E$  são El-Mahdy et al. (2010):

$$1,8 \leq \alpha \leq 2$$

$$4,8 \leq \beta \leq 5,3$$

$$0,85 \leq E \leq 1$$

Substituindo (2.4) em (2.3) e valores para  $\alpha = 1.854$ ,  $\beta = 4.854$  e  $E = 0.9$  Scucuglia (2006) obtém-se (2.5):

$$r_i = \left( \frac{18.43}{0.9^2} \right) \left( \frac{L_i |q_i|^{0.854}}{D_i^{4.854}} \right) \quad (2.5)$$

Substituindo (2.5) em (2.2), obtém-se a equação de fluxo final para os dutos:

$$\Delta p_i = \left( \frac{18.43}{0.9^2} \right) \left( \frac{L_i |q_i|^{0.854}}{D_i^{4.854}} q_i \right), \quad i = 1, \dots, m. \quad (2.6)$$

### 2.2.5. Formulação Matricial do Problema Não Linear

Tem-se uma explicação, passo-a-passo, de como encontrar a taxa de fluxo do gás  $q$  e as pressões  $p$  nos nós da rede.

1. Encontrando  $X$ ,  $F$  e  $G$ . Assumindo que a matriz de incidência definida anteriormente tem rank completo e que existe uma matriz  $\mathbf{X} \in \mathfrak{Re}^{(m \times m)}$  de tal modo que:

$$A^T X = [F|G], \quad F \in \mathfrak{Re}^{n \times n}, \quad G \in \mathfrak{Re}^{n(m-n)} \quad (2.7)$$

em que  $F$  é não singular.

2. Encontrando  $q_c$  e  $C$ . Considerando que a demanda nos nós internos  $Q$  seja uma matriz coluna ( $n \times 1$ ), temos que:

$$q_c = X \begin{bmatrix} F^{-1}Q \\ 0_{((m-n) \times 1)} \end{bmatrix}, \quad q_c \in \Re^{m \times 1} \quad (2.8)$$

$$C = X \begin{bmatrix} -F^{-1}G \\ I_{(m-n)} \end{bmatrix}, \quad C \in \Re^{m(m-n)} \quad (2.9)$$

em que  $q_c$  é uma matriz tal que  $A^T q_c = Q$ , i.e., uma solução para a formulação matricial da equações de continuidade (2.1).  $C$  é uma matriz não nula tal que  $A^T C = 0$ .

3. Resolvendo o sistema não linear em termos de  $u$  e obtenha  $q$ . Sendo que a  $A$  tem uma classificação rank completo (por suposição), a solução para o sistema linear da equação de continuidade  $A^T q_c = Q$ , pode ser escrito da seguinte forma:

$$q = q_c + Cu, \quad u \in \Re^{(m-n) \times 1} \quad (2.10)$$

por tanto, pode-se obter os valores de  $q$  solucionando um sistema  $(m - n)$  em termos de  $u$ . Observe como  $m - n$  é exatamente o número de equações de loop suficiente para aplicar a Lei de Kirchhoff. No artigo de Nielsen (1989), o autor provou que este sistema é dado por:

$$C^T(RCu + Rq_c + A_s H) = 0 \quad (2.11)$$

sendo  $R = \text{diag}[r_1(q_1), \dots, r_m(q_m)]$ , com  $r_i$  como em (2.3), e  $H = [P_1^2, \dots, P_s^2]^T$ . Após  $u$  ter sido avaliado, a partir da equação (2.10) obtém-se o fluxo no duto  $q$ .

4. Utilizando  $q$  para obter  $p$ . Conhecido o valor de  $q$  utiliza-se da equação de fluxo (2.6) para obter a pressão  $p$  em cada nó. Este processo pode ser feito iterativamente (começando nos nós de fontes, onde a pressão é conhecido) ou com um sistema de equações.

### 2.2.6. Formulação do Problema de Otimização Proposto

O problema de otimização considerado neste trabalho pode ser definido como:

$$\min_x F_1(x) \triangleq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} L_i C_k x_{ik} \quad (2.12a)$$

$$\max_x F_2(x) \triangleq \min_{j \in \{1, \dots, n\}} P_j(x) \quad (2.12b)$$

sujeito a:

$$P_j(x) \geq P_{min}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (2.13)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m. \quad k = 1, \dots, |K|. \quad (2.14)$$

em que  $K$  é o conjunto de tipos de diâmetros disponíveis no mercado;  $I$  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 no  $j$ -ésimo nó;  $x_{ik}$  uma variável binária, sendo 1 se o  $k$ -ésimo diâmetro é atribuído ao duto  $i$ , e 0 caso contrário.

As equações (2.12a) e (2.12b) referem-se ao problema multiobjetivo de minimização do custo e maximização da pressão mínima, respectivamente. A equação (2.13) 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 (2.6):

$$\Delta p_i(x) = \left( \frac{18.43}{0.9^2} \right) \left( \frac{L_i |q_i(x)|^{0.854} q_i(x)}{D_i(x)^{4.854}} \right), \quad i = 1, \dots, m.$$

### Função de Avaliação

O problema de otimização multiobjetivo irrestrito está representado em (2.15a) e (2.15b), onde a restrição do problema é tratada via uma função de penalidade:

$$\min_x F_1(x) \triangleq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} L_i C_k x_{ik} + \eta(x)(C_{max} - C_{min}) \sum_{i \in I} L_i \quad (2.15a)$$

$$\min_x F_2(x) \triangleq - \min_{j \in \{1, \dots, n\}} P_j(x) + \eta(x)(C_{max} - C_{min}) \sum_{i \in I} L_i \quad (2.15b)$$

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.

## 2.3. Revisão do Estado da Arte

O problema de dimensionamento de redes de gás natural foi abordado pela primeira vez na literatura em Rothfarb et al. (1970). A abordagem proposta nesse trabalho envolveu três objetivos principais: (a) geração de uma topologia radial para representar o problema, (b) seleção dos diâmetros dos dutos de uma rede visando a minimização da soma dos custos de investimentos e operação e (c) expansão ótima das redes existentes para incluir campos de gás recém-descobertos. Propôs-se um algoritmo híbrido baseado em programação dinâmica e heurísticas de busca local. O método proposto foi capaz de lidar com problemas de até 50 nós.

Em Hansen et al. (1991) foi proposto um algoritmo baseado em programação linear (PL) para a otimização do custo de uma rede com topologia pré-definida. No artigo são apontadas as limitações ao se utilizar programação linear em um problema não linear com variáveis discretas. O desempenho do algoritmo foi ilustrado considerando-se uma rede com 201 dutos e 172 nós.

Em Simpson et al. (1994) foi proposto um algoritmo genético para solucionar o problema de dimensionamento da rede de gás natural. Na implementação, as variáveis de decisão foram codificadas em cadeias binárias. O algoritmo foi testado em um estudo de caso presente em Goulter (1987) envolvendo uma rede radial.

Em Boyd et al. (1994) foi proposto um algoritmo genético para o problema. Utilizou-se uma função de penalidade para tratar tanto as restrições de pressão mínima quanto as de dutos de upstream (duto que recebe o direcionamento do fluxo). As soluções foram representadas como uma sequência de  $m$  inteiros, onde  $m$  é o número de dutos da rede, cada inteiro indicando o índice do diâmetro a ser escolhido para um dado duto. Apenas redes radiais foram abordadas.

Dando continuidade ao trabalho de Boyd et al. (1994), em Surry et al. (1995) propõe-se uma solução para o problema utilizando o algoritmo genético COMOGA. As restrições do problema são tratadas como um critério adicional ao custo, considerando-se uma formulação multicritério. Entretanto, esses critérios não são abordados simultaneamente como em algoritmos evolutivos multiobjetivo clássicos. As redes abordadas também são radiais, conforme em Boyd et al. (1994).

Em de Wolf and Smeers (1996) o problema foi abordado com o intuito de minimizar a soma dos custos de investimento e operação. Para isso realizou-se uma análise das propriedades matemáticas do problema e por fim aplicou-se o *bundle method* Lemarechal et al. (1981). A abordagem é testada em um problema correspondente a uma situação real, visando o projeto ótimo de reforço de uma rede radial de gás belga.

Em Costa (2004) são consideradas várias abordagens para o problema, tais como: heurística construtiva de Rothfarb et al. (1970), algoritmo genético de Surry et al. (1995), simulated annealing, busca tabu entre outros. Apenas o custo total de instalação da rede de gás natural foi considerado. Os algoritmos foram testados em 37 estudos de caso de porte real com redes radiais.

No trabalho desenvolvido por de Castro (2004) foram consideradas várias estratégias, tais como: algoritmo genético, algoritmo memético (AM) e algoritmos transgenéticos (AT) para solucionar o problema. Foram consideradas duas restrições principais: atender a demanda da rede assegurando-se uma certa pressão mínima e instalar pelo menos um duto de *upstream*. Objetivou-se minimizar o custo total da rede e foram testadas 57 instâncias aleatórias e 44 instâncias geradas a partir da biblioteca TSPLIB Reinelt (1991), todas com topologia radial.

Em Duarte (2006) foi proposto uma extensão da heurística construtiva primeiramente empregada por Rothfarb et al. (1970) e depois por Costa (2004). O algoritmo utiliza uma técnica de programação dinâmica iterativa visando reduzir a instância a um problema equivalente de menor dimensão. O algoritmo proposto foi implementado de forma a trabalhar apenas com soluções viáveis, o que significa que os movimentos considerados

em sua estrutura de vizinhança não geram soluções que violam as restrições do problema. Isto simplifica a função objetivo utilizada, no sentido de que não é necessária a aplicação de funções de penalidade. O objetivo considerado envolve apenas a minimização do custo total de instalação da rede de distribuição de gás projetada. Foram utilizadas 71 instâncias geradas a partir da biblioteca TSPLIB Reinelt (1991) com topologia radial.

No trabalho de Zecchin et al. (2006) foi implementado um algoritmo Ant Colony Optimization (ACO), o Max-Min Ant System (MMAS), com o objetivo de minimizar o custo total de instalação da rede. Esse algoritmo estimula a pesquisa local em torno da melhor solução encontrada em cada iteração, enquanto implementa métodos que desaceleram a convergência e facilitam a exploração. Neste artigo, foram considerados dois estudos de caso com redes radiais de 20 e 32 nós.

Em da Silva (2008) propõe-se uma estratégia baseada na metaheurística GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) para minimizar o custo de instalação da rede. O algoritmo sugerido pelo autor inicializa a solução com todos os dutos com o maior diâmetro disponível. Uma abordagem é empregada para a redução iterativa dos diâmetros dos dutos. Quando o algoritmo encontra uma solução na qual nenhum duto pode ter o diâmetro diminuído sem tornar a solução inviável, realiza-se um movimento de diversificação em que o diâmetro de um dos dutos é aumentado. Esse processo é repetido até alcançar um dado critério de parada. São consideradas apenas redes radiais geradas a partir da biblioteca TSPLIB Reinelt (1991).

Em El-Mahdy et al. (2010) foi desenvolvido um algoritmo genético binário para resolução do problema. Realizou-se a minimização de uma função custo penalizada. Nesse trabalho, o algoritmo genético proposto foi validado através de um estudo de caso real, considerando-se uma rede em malha com 21 dutos e 12 nós. Seus resultados são comparados com os obtidos por três engenheiros com experiência média de 6 anos em uma empresa de distribuição de gás natural. O método proposto foi capaz de encontrar resultados mais promissores e em um menor tempo que os engenheiros.

Em Mohajeri, Mahdavi and Mahdavi-Amiri (2012) foi utilizado um modelo de programação linear mista para minimizar o custo de instalação de redes de distribuição de gás natural. Nesse trabalho, considerou-se uma topologia radial para atender a demanda de 11 consumidores em um estudo de caso da Companhia de Gás Mazandaran, no Irã. No mesmo ano, Mohajeri, Mahdavi, Mahdavi-Amiri and Tafazzoli (2012) abordaram o mesmo problema utilizando um algoritmo Ant Colony Optimization.

Dando continuidade ao trabalho de Mohajeri, Mahdavi, Mahdavi-Amiri and Tafazzoli (2012), Torkinejad et al. (2018) desenvolveram um modelo para determinar a topologia radial de menor custo possível para uma rede de gás. Um algoritmo foi apresentado para problemas envolvendo redes pequenas, com o intuito de obter os diâmetros dos dutos de rede tendo em conta as restrições de pressão e fluxo máximo das redes de gás. Além disso, propôs-se um algoritmo híbrido baseado em colônia de formigas para resolver problemas com redes maiores. Os algoritmos foram testados no mesmo estudo de caso de Mohajeri, Mahdavi, Mahdavi-Amiri and Tafazzoli (2012).

Conforme revisão anterior, várias limitações podem ser identificadas na literatura: muitos trabalhos abordam apenas redes radiais ((Rothfarb et al.; 1970), (Simpson et al.; 1994), (Boyd et al.; 1994), (Surry et al.; 1995), (de Wolf and Smeers; 1996), (Costa; 2004), (de Castro; 2004), (Duarte; 2006), (Zecchin et al.; 2006), (da Silva; 2008) (Mohajeri, Mahdavi and Mahdavi-Amiri; 2012), (Mohajeri, Mahdavi, Mahdavi-Amiri and Tafazzoli; 2012), (Torkinejad et al.; 2018)); algumas abordagens são limitadas a redes pequenas, inferiores a 50 nós ((Rothfarb et al.; 1970), (Mohajeri, Mahdavi and Mahdavi-Amiri; 2012), (Mohajeri, Mahdavi, Mahdavi-Amiri and Tafazzoli; 2012), (Torkinejad et al.; 2018)); alguns trabalhos consideram apenas aproximações lineares ou quadráticas do problema ((Hansen et al.; 1991), (de Wolf and Smeers; 1996)); muitas propostas envolvem apenas a minimização do custo de instalação ((Rothfarb et al.; 1970), (Hansen et al.; 1991), (Simpson et al.; 1994), (Boyd et al.; 1994), (de Wolf and Smeers; 1996), (Costa; 2004), (de Castro; 2004), (Duarte; 2006), (Zecchin et al.; 2006), (da Silva; 2008), (El-Mahdy et al.; 2010), (Mohajeri, Mahdavi and Mahdavi-Amiri; 2012), (Mohajeri, Mahdavi, Mahdavi-Amiri and Tafazzoli; 2012), (Torkinejad et al.; 2018)).

Nesse contexto, acredita-se que os pontos apresentados a seguir representam contribuições originais desta dissertação:

- modelagem multiobjetivo do problema de dimensionamento de redes de distribuição de gás natural;
- VNS multiobjetivo dedicado ao problema, incluindo-se uma heurística construtiva inteligente;
- gerador aleatório de instâncias para o problema, baseado no banco de dados da biblioteca TSPLIB (Reinelt; 1991);

- estratégia de suporte à tomada de decisão multicritério, envolvendo-se os critérios: custo de instalação, pressão mínima, taxa de factibilidade, custo médio de falhas e sensibilidade.

## Capítulo 3.

# Ferramenta Integrada Proposta

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original.”*

— Albert Einstein, 1879–1955

## 3.1. Introdução

Nesta pesquisa propõe-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 MOVNS proposto por Duarte et al. (2015) especificamente para problemas combinatórios multiobjetivo. O algoritmo apresenta algumas variações como: reduced VNS (RVNS), general VNS (GVNS) e variable neighborhood descent (VND).

Neste capítulo são apresentados os algoritmos proposto por Duarte et al. (2015) e em seguida os algoritmos propostos como inovação deste trabalho.

## 3.2. Multi-objective VNS (MOVNS)

### 3.2.1. Multi-objective Reduced VNS (MORVNS)

O reduced VNS (RVNS) é uma das versões do VNS multiobjetivo apresentado em Duarte et al. (2015). Seu procedimento é baseado em duas ações: (i) perturbação da solução para sair de possíveis ótimos locais e (ii) mudança de vizinhança até que um critério de parada seja alcançado. O Algoritmo 3.1 mostra essas etapas na versão multiobjetivo do RVNS proposto por Duarte et al. (2015). É importante notar que no algoritmo mono-objetivo, uma solução é caracterizada por um único vetor, enquanto na versão multiobjetivo tem-se um conjunto de pontos eficientes (soluções não dominadas), representado no Algoritmo 3.1 pelo conjunto  $E$ . Os demais parâmetros são: número de vizinhanças para movimentos de *shake* ( $k_{max}$ ) e o limite de tempo de execução do algoritmo ( $t_{max}$ ).

### 3.2.2. Multi-objective General VNS (MOGVNS)

O algoritmo MOGVNS pode ser dividido em três etapas consecutivas: (i) perturbação da solução para sair de possíveis ótimos locais, (ii) VND para refinamento da solução e (iii) mudança de vizinhança até que um critério de parada seja alcançado. O Algoritmo 3.2 mostra essas etapas na versão multiobjetivo do GVNS proposta por Duarte et al. (2015).

---

**Algoritmo 3.1:** MORVNS

---

**Entrada:**  $E, k_{max}, t_{max}$

- 1  $E' = \emptyset$ ;
- 2 **repita**
- 3      $k = 1$ ;
- 4     **repita**
- 5          $E' = \text{MO-Shake}(E, k)$ ;
- 6          $E, k = \text{MO-NeighborhoodChange}(E, E', k)$ ;
- 7     **até**  $k > k_{max}$ ;
- 8 **até**  $t > t_{max}$ ;
- 9 **retorna**  $E$ ;

---

Conforme representado no Algoritmo 3.2 os parâmetros de entrada são: o conjunto de soluções  $E$ , número de vizinhanças para movimentos de *shake* ( $k_{max}$ ), o número de funções objetivo ( $r$ ), número de vizinhanças para busca local ( $k'_{max}$ ) e o limite de tempo de execução do algoritmo ( $t_{max}$ ).

---

**Algoritmo 3.2:** MOGVNS

---

**Entrada:**  $E, k_{max}, r, k'_{max}, t_{max}$

- 1 **repita**
- 2      $k=1$ ;
- 3     **repita**
- 4          $E' = \text{MO-Shake}(E, k)$ ;
- 5          $E'' = \text{MO-VND}(E', k'_{max}, r)$ ;
- 6          $E, k = \text{MO-NeighborhoodChange}(E, E'', k)$ ;
- 7     **até**  $k > k_{max}$ ;
- 8 **até**  $t > t_{max}$ ;
- 9 **retorna**  $E$ ;

---

### 3.2.3. Busca Local: Multi-objective VND (MOVND)

Na abordagem de busca local, denominada MOVND (Algoritmo 3.3), as vizinhanças são exploradas para cada objetivo  $i$  separadamente, por meio de uma execução específica de VND- $i$  (Algoritmo 3.4). Os parâmetros de entrada são um conjunto de soluções ( $E$ ), o número de vizinhanças na busca local ( $k'_{max}$ ) e o número total de objetivos ( $r$ ).

Uma iteração começa com a seleção aleatória de uma solução incumbente  $x'$  do conjunto de pontos não explorados de  $E$  (linha 5). O conjunto  $S$  representa os pontos utilizados, agrupados por objetivo ( $S_1, S_2, \dots, S_r$ ) e atualizados após cada execução de

VND-i (linha 7). As melhorias no conjunto de pontos são analisadas pela função MO-ObjectiveChange que será apresentada na sequência. Desta forma o código é executado até que todos os objetivos sejam otimizados.

---

**Algoritmo 3.3: MO-VND**


---

**Entrada:**  $E, k'_{max}, r$

- 1  $S_1 = \{\}, S_2 = \{\}, \dots, S_r = \{\}$ ;
- 2  $i = 1$ ;
- 3 **repita**
- 4     **repita**
- 5          $x' = \text{SelectRandom}(E \setminus S_i)$ ;
- 6          $E_i = \text{VND-i}(x', k'_{max})$ ;
- 7          $S_i = S_i \cup E_i$ ;
- 8     **até**  $E \setminus S_i = \emptyset$ ;
- 9      $E, i = \text{MO-ObjectiveChange}(E, S_i, i)$ ;
- 10 **até**  $i > r$ ;
- 11 **retorna**  $E$ ;

---

O Algoritmo 3.4 demonstra como a busca local do VND-i é feita em relação ao objetivo  $i$ . Note que, como no método original VND, a transição entre vizinhanças é realizada de forma determinística, em que cada estrutura de vizinhança é indicada por  $k$  (com  $k \in \{1, \dots, k'_{max}\}$ ).

Um novo ponto  $x'$  é definido como a melhor solução na vizinhança  $k$  do vetor  $x$  em relação ao objetivo  $i$  (linha 4). Em caso de melhoria, a solução  $x$  é substituída por  $x'$  e uma nova inspeção de vizinhança é feita a partir de  $k = 1$ . A principal diferença entre o Algoritmo 3.4 e o VND original é que um conjunto de pontos não dominados  $E$  é atualizado através das buscas e no final do procedimento são retornadas as soluções não dominadas (linha 5). Esse conceito de dominância é definido como: dada duas soluções  $x_1$  e  $x_2$ , diz-se que  $x_1$  domina  $x_2$  se, e somente se,  $F_i(x_1) \leq F_i(x_2)$  para todo  $i = 1, \dots, r$ , e existe pelo menos um objetivo  $i$  em que  $F_i(x_1) < F_i(x_2)$  (Miettinen; 2012). Nessa definição,  $F_i(\cdot)$  representa um dado objetivo de otimização e  $r$  o número total de objetivos considerados.

### 3.2.4. MO-NeighborhoodChange

O Algoritmo 3.5 elucida como funcionam os procedimentos MO-NeighborhoodChange e MO-ObjectiveChange. Assim como na versão mono-objetivo, uma vizinhança  $k$  é alterada para  $k + 1$  quando não há mais melhorias na busca atual. As melhorias são

verificadas na função MO-Improvement. Caso MO-Improvement retorne *true*, ou seja, houve melhoria, então a estrutura de vizinhança é reinicializada (linha 2) e as soluções são atualizadas. A função Update (linha 3) é responsável por essa atualização, a qual retorna as soluções não-dominadas da união entre  $E$  e  $E'$ . Caso MO-Improvement retorne *false*, passa-se para a próxima estrutura de vizinhança.

A função MO-Improvement (Algoritmo 3.6) é responsável por verificar se houve melhoria entre os conjuntos de soluções  $E$  e  $E'$ . Uma melhoria é assumida como verdadeira se pelo menos uma solução  $x' \in E'$  não for dominada por nenhum dos pontos de  $E$ . Isso leva à atualização da frente aproximada de Pareto.

### 3.2.5. MO-Shake

A versão multiobjetivo do procedimento de perturbação, MO-Shake, é apresentada no Algoritmo 3.7. Seu principal objetivo é perturbar o conjunto de pontos para promover buscas em novas regiões. A função *Shake* é responsável por modificar cada solução do conjunto  $E$ , de acordo com a vizinhança  $k$ , para criar um novo conjunto de pontos  $E'$ .

## 3.3. Abordagens Propostas

Nesta seção são apresentadas as principais abordagens propostas nesta dissertação. Na seção 3.3.1 apresenta-se uma heurística construtiva proposta para a geração de uma solução inicial para o MOVNS. Na seção 3.3.2 são definidas as estruturas de vizinhança utilizadas, específicas às características do problema abordado. Na seção 3.3.3 apresenta-se o gerador de instâncias implementado. Na seção 3.3.4 sugere-se uma proposta robusta para o MO-Improvement, menos sensível ao problema de deterioração observado em metaheurísticas multiobjetivo. Por fim, na seção 3.3.5, discute-se a metodologia para a análise multicritério empregada neste trabalho.

### 3.3.1. Solução Inicial

Para a construção de uma solução inicial para o problema elaborou-se uma heurística construtiva (Algoritmo 3.8) para o mapeamento de uma solução factível ou, pelo menos, com um baixo índice de infactibilidade.

As entradas do Algoritmo 3.8 são representadas pelo número de nós internos da rede ( $n$ ), número de dutos ( $m$ ), pressão mínima exigida nos nós da rede ( $P_{min}$ ), máximo diâmetro disponível ( $D_{max}$ ) e percentual de nós selecionados ( $\delta$ ).

A solução inicial,  $x$ , é definida com todos os dutos iguais ao menor diâmetro disponível (linha 1). O algoritmo será interrompido apenas quando uma solução factível for encontrada ou um critério de estagnação for alcançado.

Na linha 6 retorna-se o montante de violação da pressão mínima para cada um dos nós da rede. Em seguida, na linha 7 são selecionados no máximo  $\lceil \delta n \rceil$  nós arbitrários, nos quais a pressão é violada.

Entre as linhas 8 e 17 são geradas soluções vizinhas à solução incumbente, aumentando-se em uma unidade os diâmetros dos dutos conectados aos nós selecionados anteriormente. Essas perturbações visam construir soluções, cujas violações de pressão mínima nos nós sejam menores que as observadas na solução incumbente ou mesmo inexistentes.

Posteriormente, entre as linhas 18 e 31, identifica-se a solução com menor valor de função objetivo  $F_2$  (linha 19) e, caso seja melhor que a solução incumbente e viável, o algoritmo é encerrado; caso contrário, o processo continua até que um dos critérios de parada seja alcançado. A melhor solução obtida é retornada no final do algoritmo.

### 3.3.2. Estruturas de Vizinhança

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.

**Algoritmo 3.4:** Heurística Construtiva

---

```

Entrada:  $n, m, P_{min}, D_{max}, \delta \in [0, 1]$ 
1  $x = ones(1, m);$  // solução inicial definida apenas pelos dutos mais baratos
2  $feasible = false;$  // solução inicial supostamente inviável
3  $stagnate = 0;$ 
4 repita
5    $X = \emptyset;$ 
6    $vnode(j) = \max(0, P_{min} - P_j(x)), \forall j \in \{1, \dots, n\};$  // violação de pressão nos nós
7    $I = SelectRandomInfeasibleNodes(vnode, \lceil \delta n \rceil);$  // seleção arbitrária de  $\lceil \delta n \rceil$  nós
8   para  $v \in I$  faça
9      $pipes = PipesConnectedTo(v);$  // identifica os dutos conectados ao nó  $v$ 
10    para  $p \in pipes$  faça
11      se  $x(p) < D_{max}$  então
12         $y = x;$ 
13         $y(p) = y(p) + 1;$ 
14         $X = X \cup \{y\};$ 
15      fim
16    fim
17  fim
18  se  $X \neq \emptyset$  então
19     $y = \min_{x \in X} F_2(x);$  // função  $F_2(\cdot)$  definida conforme (2.15b)
20    se  $F_2(y) < F_2(x)$  então
21       $x = y;$ 
22       $stagnate = 0;$ 
23      se  $\min_{j \in \{1, \dots, n\}} P_j(x) > P_{min}$  então
24         $feasible = true;$  // caso a solução atual seja viável
25      fim
26    fim
27    senão
28       $stagnate = stagnate + 1;$  // caso nenhuma melhora seja verificada
29    fim
30  fim
31  senão
32     $stagnate = stagnate + 1;$ 
33  fim
34 até  $feasible = true \parallel stagnate > n;$ 
35 retorna  $x$ 

```

---

- Troca dos diâmetros de dois dutos aleatório quaisquer da rede.

### 3.3.3. 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. Essas instâncias são representadas 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. Elabora-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).

### 3.3.4. MO-Improvement\* e MO-NeighborhoodChange\*

Os métodos MO-NeighborhoodChange (Algoritmo 3.5) e MO-Improvement (Algoritmo 3.6), 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 (i.e.,  $|E| \geq N$ ), 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 nos Algoritmos 3.9 e 3.10.

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 apresentada nos Algoritmos 3.11 e 3.12.

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

---

**Algoritmo 3.5: MO-Improvement\***


---

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

```

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

---

### 3.3.5. Análise Multicritério

A análise multicritério foi realizada considerando cenários de incerteza de evolução da carga para auxiliar na tomada de decisão final. Modelou-se o crescimento da demanda nos nós internos da rede visando determinar uma configuração de rede de distribuição que responderá a um aumento na demanda nominal de cada nó ao longo de um dado

---

**Algoritmo 3.6:** ImproveNDSet

---

**Entrada:**  $x, E$

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

---



---

**Algoritmo 3.7:** MO-NeighborhoodChange\*

---

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

- 1 **se**  $\text{MO-Improvement}^*(E, E')$  **então**
- 2 |  $A = \text{Update}(E, E');$
- 3 | **se**  $\text{improveHV}(E, A)$  **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 3.8:** ImproveHV

---

**Entrada:**  $E, A$

- 1 **se**  $\text{hypervolume}(A) > \text{hypervolume}(E)$  **então**
- 2 | **retorna** *true*;
- 3 **fim**
- 4 **senão**
- 5 | **retorna** *false*;
- 6 **fim**

---

horizonte de tempo. Tendo em vista que o crescimento real é desconhecido, utilizou-se uma função distribuição de probabilidade Gaussiana para modelar o comportamento da rede.

O procedimento proposto é descrito a seguir:

- Para um período de tempo específico, gerou-se um conjunto de  $N_s$  cenários de demanda usando uma distribuição Gaussiana. Para este trabalho foram utilizados  $N_s = 2000$  cenários, um horizonte de 10 anos. De forma geral, assumiu uma média 0.025 e desvio padrão amostral 0.012 para o primeiro ano, o que resulta na média 0.28 e desvio padrão 0.127 no décimo ano.
- Todas as soluções não-dominadas encontradas (configurações de rede) foram avaliadas em todos os cenários, considerando-se quatro funções de mérito pré-estabelecidas: pressão mínima; taxa de viabilidade; custo de falha médio; sensibilidade;
- Realizou-se uma análise de dominância, com o intuito de extrair um subconjunto final de soluções não-dominadas a partir do conjunto inicial de soluções candidatas.

As funções de mérito pré-estabelecidas são modeladas a seguir.

### Custo de Instalação

Essa função se trata dos custos que envolvem, principalmente, obras civis, aquisição de equipamentos de controle de pressão, medidores de vazão e tubos (Goldbarg et al.; 2004). Neste trabalho, o custo de instalação é dado por (2.12a):

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

### Pressão Mínima

A pressão mínima garante que as demandas da rede serão atendidas, e é definida conforme (2.12b):

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

### Taxa de Factibilidade

A taxa de factibilidade é definida como a relação entre o número de cenários nos quais a configuração da rede não viola o limite de pressão mínima ( $N_f$ ) e o número total de cenários ( $N_s$ ):

$$F_3(x) = \frac{N_f(x)}{N_s} \quad (3.1)$$

### Custo Médio de Falhas

A função  $F_4$  representa o custo médio de falha esperado na rede, o qual é avaliado considerando-se os cenários em que a rede é viável:

$$F_4(x) = \frac{1}{N_f(x)} \sum_{j=1}^{N_f(x)} y_j(x) \quad (3.2)$$

onde  $y_j$  é o custo de falha para o cenário  $j$ , dado por (3.3):

$$y_j(x) = \mu \sum_{i=1}^m \lambda_i t_i q_{i,j}(x) \quad (3.3)$$

em que  $\mu$  é a taxa de fluxo de gás ( $\$/h/m^3$ );  $\lambda_i$  a taxa de falha por unidade de comprimento do duto  $i$  ( $(m.h)^{-1}$ );  $t_i$  a duração média da falta do duto  $i$  ( $h$ ) e  $q_{i,j}(\cdot)$  o fluxo de gás no duto  $i$  para o cenário  $j$  ( $m^3/h$ ). Os valores adotados neste trabalho são:

$$\mu = 0.10 \ (\$/h/m^3)$$

$$\lambda_i = 10^{-4} \ ((m.h)^{-1}), \ \forall i \in \{1, \dots, m\}$$

$$t_i = 1 \ (h), \ \forall i \in \{1, \dots, m\}$$

### Sensibilidade

A sensibilidade permite avaliar o comportamento da rede caso algum duto tenha um mal funcionamento. Neste trabalho, o impacto devido a um mal funcionamento de um duto foi modelado como a redução do seu diâmetro para 50% do seu valor nominal. A função

de sensibilidade modelada a seguir considera o somatório dos efeitos de falha de cada um dos dutos da rede (falhas simultâneas não são consideradas):

$$F_5(x) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{N_a(x)} \sum_{j=1}^n \Omega_j^i(x) \right) \quad (3.4)$$

$$\text{em que } \Omega_j^i(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } P_j^i(x) \geq P_{min} \\ (P_{min} - P_j^i(x))^2, & \text{se } P_j^i(x) < P_{min} \end{cases}$$

sendo  $N_a(\cdot)$  o número de nós da solução  $x$  que não violam a restrição de pressão mínima.



# Capítulo 4.

## Resultados

*“O conhecimento é o processo de acumular dados; a sabedoria reside na sua simplificação.”*

— Martin H. Fischer, 1879–1962

## 4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados o planejamento experimental e os resultados obtidos pela ferramenta proposta. Os experimentos são divididos em três etapas: (i) investigação de variações da heurística construtiva proposta anteriormente, para a definição da solução inicial dos algoritmos MORVNS e MOGVNS, (ii) comparação do desempenho de alguns algoritmos multiobjetivo aplicados à solução do problema e (iii) utilização do algoritmo multiobjetivo de melhor desempenho para a otimização do estudo de caso proposto por El-Mahdy et al. (2010). Por fim, realiza-se uma análise multicritério sob condições de incerteza da evolução da demanda e uma tomada de decisão final. Os resultados são apresentados e discutidos.

## 4.2. 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 o problema: Berlin52a, Berlin52b, Eil51a, Eil51b, Eil76a, Eil76b, St70a, St70b e Rd100a. Em todos os experimentos foram coletados 5 execuções dos algoritmos em cada instância.

A heurística descrita pelo Algoritmo 3.4 permite diversas possibilidades de valores para  $\delta$  (percentual que controla o número de nós violados que serão selecionados). Para investigar qual a melhor porcentagem que resulta em soluções de baixo custo e seguras para a rede, realizou-se comparações entre cinco valores de  $\delta$ : 10%, 20%, 30%, 50% e 100%. O valor mais promissor de  $\delta$  foi empregado nos demais experimentos.

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.

Por fim, o algoritmo multiobjetivo de melhor desempenho é aplicado no estudo de caso apresentado em El-Mahdy et al. (2010).

### 4.3. Resultados das Heurísticas Construtivas

As heurísticas comparadas, referentes ao Algoritmo 3.4 com  $\delta$  igual a 10%, 20%, 30%, 50% e 100%, foram executadas 5 vezes em cada instância. O algoritmo com  $\delta = 100%$  foi executado apenas uma vez em cada instância, pois representa um método determinístico.

Em cada iteração foram extraídos os valores da função de custo (2.12a), função de pressão mínima (2.12b), tempo (em horas) e o número de avaliações de funções (*naf*).

Os resultados obtidos pelas simulações das heurísticas construtivas são apresentados na Tabela 4.1. Como pode ser visto, os algoritmos mais promissores são aqueles com  $\delta = 100%$  e  $\delta = 20%$ . Os resultados com  $\delta = 50%$  não se sobressaíram em nenhuma instância.

No entanto, levando em consideração a variável tempo, tem-se que quanto maior a porcentagem de  $\delta$  maior o tempo de execução do algoritmo. Este fato pode ser observado na Figura 4.1, que contém o tempo exigido para quatro instâncias: Berlin52a, Eil76a, St70a e Rd100a. Em instâncias maiores como na Rd100a é possível notar que o tempo exigido para  $\delta = 100%$  é superior em aproximadamente 100 minutos se  $\delta = 20%$ . Portanto, visando a construção rápida de uma solução inicial de qualidade, optou-se por adotar  $\delta = 20%$  no Algoritmo 3.4.

**Tabela 4.1.:** Resultados das Heurísticas Construtivas. Em negrito estão os melhores resultados de  $F_1$  e  $F_2$  para cada instância

Instâncias	Dados	$\delta = 10\%$	$\delta = 20\%$	$\delta = 30\%$	$\delta = 50\%$	$\delta = 100\%$
Berlin52a	$F_1$	17973419 (460236.43)	<b>17086435 (55068.063)</b>	17161570 (53111.551)	17339119 (450516.46)	17100056
	$F_2$	-3.7567525 (1.01481)	-3.697604 (0.8782979)	-3.8716088 (1.0368241)	-3.5721108 (0.6016684)	<b>-4.113568</b>
Berlin52b	$F_1$	20031729 (455555.26)	19056883 (193052.31)	<b>19051324 (230251.4)</b>	19536124 (580529.18)	19105693
	$F_2$	-3.9714958 (0.5070126)	<b>-4.6774223 (1.0211511)</b>	-4.5485276 (0.8426214)	-3.6660697 (0.9039257)	-3.5080236
Eil51a	$F_1$	1011036.9 (396.38006)	1011111.3 (510.86891)	1010924.7 (417.12272)	1010924.7 (417.12272)	<b>1010738.2</b>
	$F_2$	-10.709201 (0.793464)	-11.512175 (0.2041497)	-11.58672 (0.1666876)	-11.58672 (0.1666876)	<b>-11.661265</b>
Eil51b	$F_1$	900753.03 (373.34743)	900681.48 (475.20584)	900544.61 (160.51055)	900427.39 (131.05632)	<b>900368.78</b>
	$F_2$	-8.5510955 (1.3061492)	-9.4450472 (1.1494343)	-9.8813211 (0.3579891)	-10.142759 (0.2922971)	<b>-10.273478</b>
Eil76a	$F_1$	1287413.1 (6063.7345)	1281550.7 (4414.0826)	1279364.3 (2493.0903)	1277329.9 (694.4358)	<b>1276445.3</b>
	$F_2$	-4.730535 (2.4906616)	-3.5977824 (0.6950978)	-5.0832952 (0.9790604)	-4.8149472 (1.0157106)	<b>-5.1356277</b>
Eil76b	$F_1$	1321500.1 (161.94021)	<b>1321501 (155.2186)</b>	1321598.1 (82.07307)	1321508.4 (0)	1321508.4
	$F_2$	-6.7033038 (0.8776793)	-6.8344045 (1.055581)	-7.1909892 (0.9082248)	-7.7541904 (1.637D-08)	<b>-7.7541905</b>
St70a	$F_1$	1458279.9 (13838.534)	1447045.3 (4149.6531)	1442912.6 (3261.0312)	1442067.9 (2134.5609)	<b>1439719.6</b>
	$F_2$	-4.4679602 (2.3325858)	<b>-5.5028643 (1.1173783)</b>	-5.0141811 (0.5419226)	-5.0237932 (0.2327595)	-4.8249578
St70b	$F_1$	1557244.6 (2705.7731)	<b>1550324.7 (269.43029)</b>	1550609.1 (686.58212)	1552819.4 (1390.1355)	1550596.1
	$F_2$	-5.459265 (2.7680412)	-5.1127551 (1.56215)	<b>-6.0376084 (0.4043314)</b>	-5.9562701 (0.5482021)	-5.2338333
Rd100a	$F_1$	18551444 (81426.252)	18355597 (76096.332)	18308626 (108521.85)	18251034 (82849.698)	<b>18211813</b>
	$F_2$	<b>-4.4305179 (0.6208833)</b>	-3.8764242 (1.1404372)	-3.1637619 (0.4087293)	-3.7721833 (0.2907493)	-3.4888456

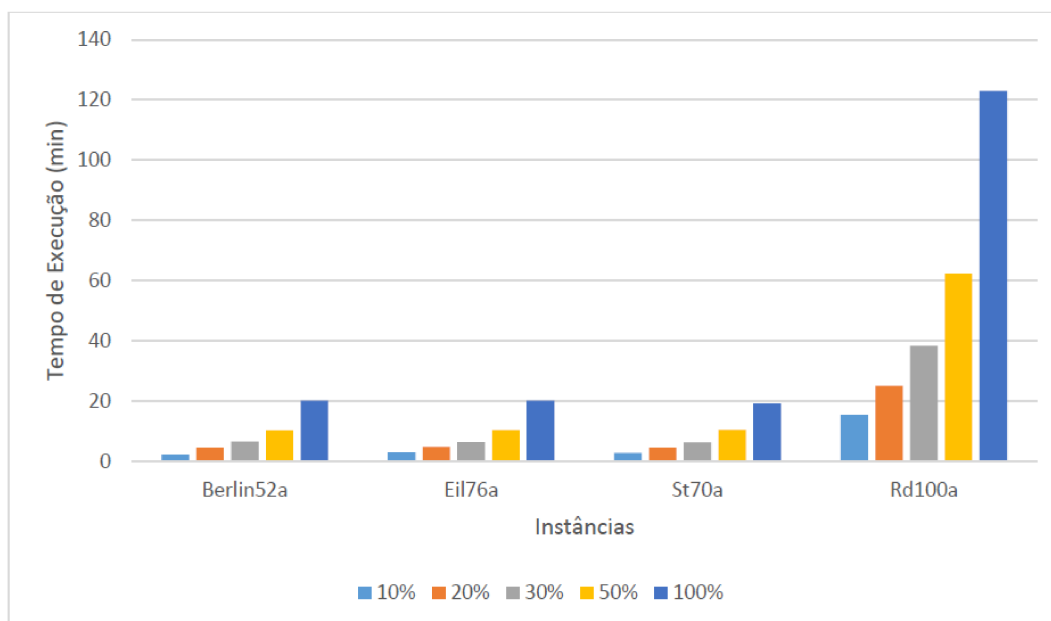


Figura 4.1.: Tempo de execução das heurísticas construtivas

## 4.4. Resultados dos Algoritmos Multiobjetivo

Nos experimentos apresentados nesta seção considerou-se a heurística construtiva com  $\delta = 20\%$ .

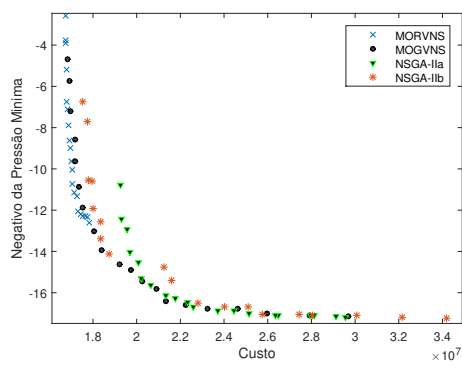
Os parâmetros utilizados nos algoritmos NSGA-II *a* e *b* são compatíveis com os utilizados pelo algoritmo genético mono-objetivo proposto em El-Mahdy et al. (2010). O algoritmo utiliza variáveis binárias de 3 bits e as probabilidades de reprodução e mutação são de 100% e 5%, respectivamente. Na seleção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

Para comparar os algoritmos MORVNS, MOGVNS, NSGA-IIa e NSGA-IIb, foram executadas 5 repetições para cada instância. A Tabela 4.2 mostra a média e o desvio padrão do hipervolume e do tempo (em horas) exigido em cada execução.

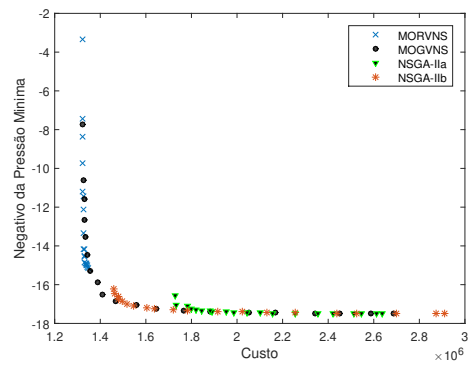
Pela Tabela 4.2 é possível observar que o algoritmo MOGVNS apresenta, na maioria das vezes, o maior hipervolume calculado. A Figura 4.2 mostra exemplos das fronteiras Pareto estimadas para as instâncias Berlin52a, Eil76b, Eil70b e Rd100a. A partir desses resultados, é possível notar que o algoritmo MOGVNS 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,

**Tabela 4.2.:** Resultados dos Algoritmos Multiobjetivo. Em negrito estão os melhores resultados das médias do hipervolume (HV) e a média do tempo (em horas).

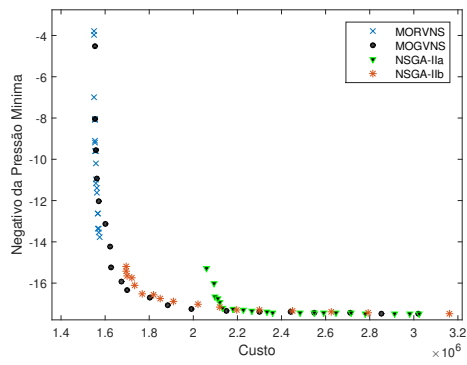
Instâncias	Dados	MORVNS	MOGVNS	NSGAIa	NSGAIb
Berlin52a	<i>HV</i>	0.9311(0.0470)	<b>1.1093(0.0170)</b>	1.0309(0.0200)	1.0969(0.0064)
	<i>Tempo</i>	0.4069(0.0368)	10.5921(3.6504)	0.4252(0.0034)	10.7607(0.0243)
Berlin52b	<i>HV</i>	0.9584(0.0379)	1.0678(0.0058)	1.0041(0.0136)	<b>1.0688(0.0051)</b>
	<i>Tempo</i>	0.3922 (0.0363)	11.0678(1.8038)	0.4145 (0.0027)	11.1542(0.0350)
Eil51a	<i>HV</i>	1.0287(0.0190)	<b>1.1819(0.0025)</b>	0.9970(0.0143)	1.1500(0.0033)
	<i>Tempo</i>	0.2068 (0.0205)	18.6148(5.8375)	0.2202(0.0010)	18.6097(0.040)
Eil51b	<i>HV</i>	1.0520(0.0388)	<b>1.1801(0.0020)</b>	0.9997(0.0274)	1.1431(0.0052)
	<i>Tempo</i>	0.1936(0.0352)	9.0646(2.7912)	0.2059(0.011)	8.9919(0.0201)
Eil76a	<i>HV</i>	0.9009(0.0327)	<b>1.1558(0.0019)</b>	0.9615(0.0212)	1.1131(0.0034)
	<i>Tempo</i>	0.4282 (0.0381)	73.1421(3.8031)	0.4682(0.0035)	118.041(1.6518)
Eil76b	<i>HV</i>	1.0548(0.0183)	<b>1.1896(0.0005)</b>	0.9361(0.0167)	1.1316(0.0091)
	<i>Tempo</i>	0.363(0.0167)	88.1583(8.2281)	0.3919(0.0010)	169.5935(3.8554)
St70a	<i>HV</i>	0.8650(0.0658)	<b>1.1449(0.0059)</b>	1.0921(0.0178)	1.0921(0.0034)
	<i>Tempo</i>	0.3936(0.0412)	39.5511(18.9924)	0.4236(0.0074)	40.8917(0.2716)
St70b	<i>HV</i>	0.9410(0.0161)	<b>1.1760(0.0054)</b>	0.9621(0.0206)	1.1243(0.0053)
	<i>Tempo</i>	0.346(0.0132)	49.3214(21.1611)	0.3741(0.0034)	52.2361(0.2673)
Rd100a	<i>HV</i>	0.7624 (0.0325)	<b>1.0971 (0.0063)</b>	0.8922(0.0140)	1.0223(0.0081)
	<i>Tempo</i>	1.2176(0.1136)	149.6018(42.2332)	1.3124(0.0126)	152.9746(4.3726)



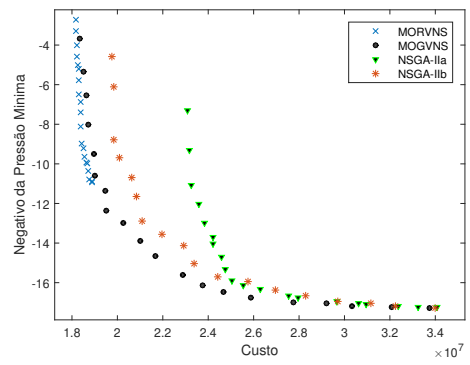
(a) Resultado para Berlin52a



(b) Resultado para Eil76b



(c) Resultado para Eil70b



(d) Resultado para Rd100a

**Figura 4.2.:** Fronteiras obtidas pelos algoritmos multiobjetivo

tende a mapear soluções com custo mais 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 and Runger; 2003):

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

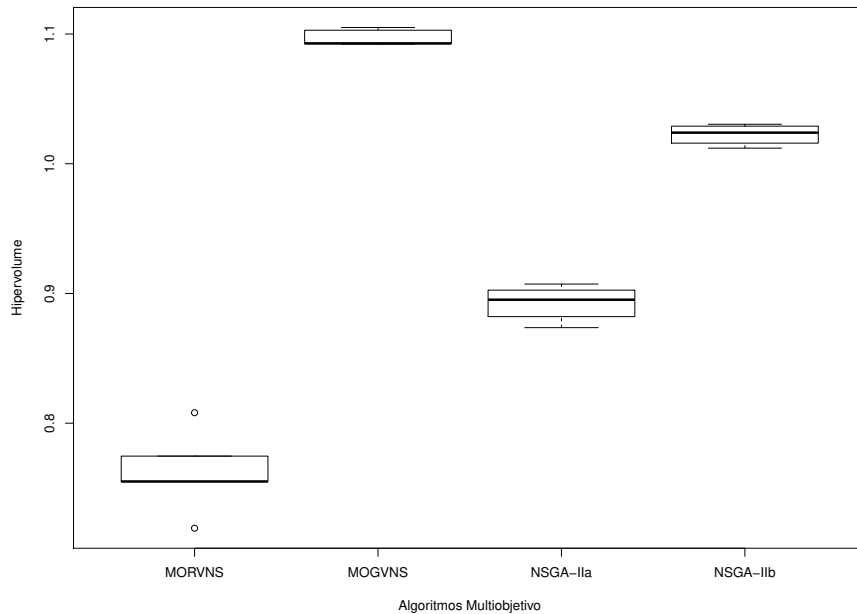
Os resultados da ANOVA indicaram que existem diferenças entre os métodos, i.e., com o  $p$ -valor  $< 0.05$ . As premissas da normalidade e da homocedasticidade foram respeitadas; utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Bartlett respectivamente.

O teste de comparações múltiplas de Tukey (Tukey; 1953) foi realizado para identificar as médias dos algoritmos que são estatisticamente diferentes entre si (Campelo; 2018). 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 Rd100a 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 4.2. Este fato pode ser observado também por meio da Figura 4.3.

Com relação ao tempo computacional dos algoritmos, mostrado na Tabela 4.2, é possível notar que os algoritmos MORVNS e NSGA-IIa exigem um tempo de execução similar. Da mesma forma, é possível notar essa similaridade entre os algoritmos MOGVNS e NSGA-IIb. Essa aproximação se deve ao mesmo critério de parada desses algoritmos.



**Figura 4.3.:** Boxplot do resultado da instância Rd100a.

No entanto, é possível notar que 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.

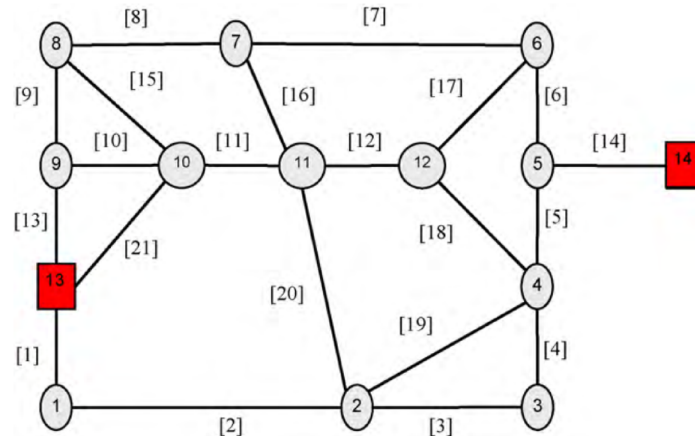
Entretanto, devido a qualidade das soluções apontadas pelos algoritmos MOGVNS e NSGA-IIb, julga-se que o tempo em questão não seja tão relevante quanto a qualidade das soluções obtidas, visto que não é necessária uma solução em um curto intervalo de tempo, mas sim um projeto eficiente. De forma geral, 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.

Tendo em vista as considerações anteriores, decidiu-se aplicar o MOGVNS no estudo de caso abordado a seguir.

## 4.5. Estudo de Caso

A instância utilizada neste estudo de caso foi proposta em El-Mahdy et al. (2010). Neste artigo, os autores compararam as soluções obtidas via um algoritmo genético binário com as soluções dadas por três engenheiros com 6 anos, em média, de experiência.

A rede é formada por  $m = 21$  tubos,  $n = 12$  nós internos e  $r = 2$  nós de fonte, como pode ser visto pela Figura 4.4:



**Figura 4.4.:** Rede empregada no estudo de caso. Adaptada de El-Mahdy et al. (2010).

As informações necessárias para os dados de entrada da rede são apresentadas no Apêndice A: diâmetros dos dutos ( $D$ ) (Tabela A.1), demanda nos nós interiores ( $Q$ ) (Tabela A.2), pressão nos nós fonte ( $P$ ) (Tabela A.3) e comprimento dos dutos ( $L$ ) (Tabela A.4).

#### 4.5.1. Resultados Obtidos pela Abordagem Proposta

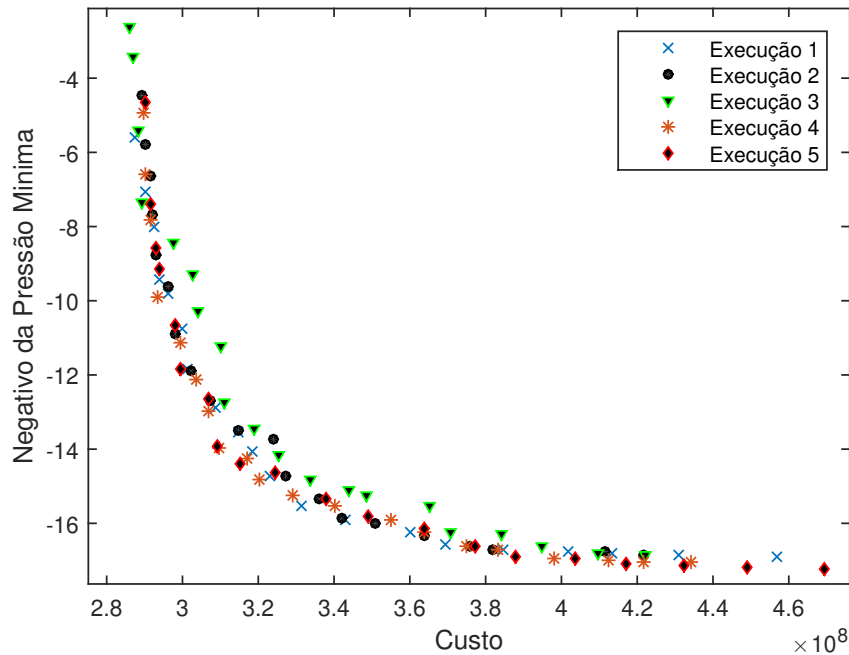
A Tabela 4.3 resume os resultados encontrados pelo trabalho desenvolvido em El-Mahdy et al. (2010) e pelos três engenheiros citados. Além disso, a Tabela 4.3 contém o resultado da heurística construtiva utilizada como solução inicial do MOGVNS para resolução do estudo de caso. Para a solução da heurística construtiva apresentada realizou-se cinco execuções e a solução selecionada foi a de menor custo.

Como pode ser visto, a solução inicial gerada apresenta resultados próximos aos obtidos por El-Mahdy et al. (2010), visto que o custo e a pressão mínima da heurística utilizada foram melhores que os resultados propostos pelos Engenheiros A e B. O resultado do Engenheiro C mostra um maior valor de custo e uma pressão mínima pouco maior que a obtida pela heurística. O resultado proposto por El-Mahdy et al. (2010) evidencia um valor do custo e de pressão mínima menores que os da solução inicial utilizada neste trabalho.

**Tabela 4.3.:** Resultados obtidos pela heurística construtiva e os resultados de El-Mahdy et al. (2010).

Duto	Heurística Proposta	El-Mahdy et al.	Engenheiro A	Engenheiro B	Engenheiro C
1	2	3	3	2	3
2	1	3	2	3	1
3	1	1	2	3	2
4	3	2	2	3	3
5	3	2	2	3	3
6	4	3	2	3	3
7	2	1	2	3	1
8	1	1	2	2	1
9	2	2	2	2	3
10	3	2	3	2	1
11	3	2	2	1	3
12	1	1	1	1	3
13	4	3	4	1	3
14	4	5	4	3	3
15	1	2	1	3	1
16	1	1	1	1	1
17	2	2	2	2	1
18	1	1	2	3	3
19	1	1	1	3	1
20	1	1	1	3	1
21	1	2	3	2	3
$P_{min}$ (bar)	4.3	2.8	2.8	2.6	4.8
Custo (\$)	299880350.00	289700950.00	300276200.00	324824500.00	301744450.00

Realizou-se cinco execuções do MOGVNS. As fronteiras obtidas (Figura 4.5) mostra a capacidade de reprodutibilidade dos resultados pelo método utilizado.



**Figura 4.5.:** Fronteiras obtidas pelo MOGVNS no estudo de caso

Selecionou-se a fronteira de maior hipervolume (execução 5) e realizou-se a análise multicritério, avaliando o custo de instalação, pressão mínima, taxa de factibilidade, custo médio de falhas e a sensibilidade. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 4.4. A solução proposta por El-Mahdy et al. (2010) e pelos três engenheiros também foram avaliadas nos cinco critérios, conforme mostra a Tabela 4.5.

A partir dos resultados obtidos é notável a dificuldade de conseguir soluções de baixo custo e de pressões elevadas devido ao forte conflito entre os dois objetivos. Além disso, a partir da metodologia utilizada é possível observar que critérios importantes (como os abordados) não podem ser ignorados no momento do planejamento da rede, pois apresentam características interessantes sobre o comportamento de uma rede sob condições de incerteza.

Um exemplo da eficiência da abordagem proposta são as soluções 2, 6, 11, 19 e 20 (Tabela 4.4) que apresentaram menor custo de instalação, maior valor de pressão mínima, maior factibilidade e uma menor sensibilidade se comparada com as soluções dos três engenheiros (Tabela 4.5).

**Tabela 4.4.:** Resultados da análise multicritério

Solução	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
1	324336950	14.6	100%	16429.9	224.8
<b>2</b>	<b>297990000</b>	<b>10.6</b>	<b>46.5%</b>	<b>15344.2</b>	<b>4374.4</b>
3	449053150	17.2	100%	16603.9	0
4	377060950	16.6	100%	16101.3	0
5	290109050	4.6	2.32%	12821.3	20461.5
<b>6</b>	<b>293694100</b>	<b>9.1</b>	<b>20.25%</b>	<b>14499.3</b>	<b>4982.7</b>
7	432156550	17.1	100%	16119.6	0
8	417264050	17.1	100%	16134.5	0
9	469551250	17.2	100%	16701.6	0
10	306649000	12.7	93.9%	16275.2	1519.7
<b>11</b>	<b>293081950</b>	<b>8.6</b>	<b>14.6%</b>	<b>14046.4</b>	<b>6108.7</b>
12	387994250	16.9	100%	15858.6	0
13	309160600	13.9	99.8%	16303.2	894.3
14	337797600	15.3	100%	16404.3	8.8
15	349038900	15.8	100%	17089.1	0
16	315314650	14.4	100%	16349.0	537.6
17	403719750	16.9	100%	15997.7	0
18	363596100	16.1	100%	16360.4	0
<b>19</b>	<b>299677000</b>	<b>11.8</b>	<b>77.65%</b>	<b>15377.7</b>	<b>2227.1</b>
<b>20</b>	<b>291723950</b>	<b>7.4</b>	<b>7.65%</b>	<b>13408.0</b>	<b>7732.3</b>

**Tabela 4.5.:** Soluções de El-Mahdy et al. (2010) avaliadas nos critérios propostos.

Solução	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
El-Mahdy	289700950	2.8	1,30%	12945.9	12902.2
Eng. A	300276200	2.8	1,30%	12832.0	12223.4
Eng. B	324824500	2.6	1,11%	12809.0	$8.5932 \times 10^{19}$
Eng. C	301744450	4.8	2,45%	12757.4	16442.1

Com o intuito de realizar uma tomada de decisão com base nos critérios apresentados na Tabela 4.4, levando em consideração o custo de instalação, pressão mínima, taxa de factibilidade, custo médio de falhas e sensibilidade da rede, optou-se pela solução 19.

A solução escolhida contém um valor de custo inferior ao de todos os engenheiros da Tabela 4.5. A pressão mínima é elevada e superior a todos os resultados apresentados em El-Mahdy et al. (2010). Contém uma taxa de factibilidade alta (77.65%) enquanto a maior taxa apresentada na Tabela 4.5 é de 2.45%; seu valor de custo médio de falhas é o quinto menor da Tabela 4.4 e a sensibilidade é menor que todas as apresentadas pelo artigo utilizado como referência.

## 4.6. Discussão Final

Os resultados apresentados neste capítulo ilustram como o procedimento abordado é capaz de fornecer soluções promissoras com características diferentes. Dos resultados obtidos, apresentados na Tabela 4.4, alguns são mais baratos - tanto na instalação quanto no custo médio das falhas - enquanto outros têm maior probabilidade de fornecer gás adequadamente em toda a rede - maior viabilidade e menor sensibilidade.

Além disso, quando se compara a Tabela 4.5 com a Tabela 4.4, pode-se observar que, dada uma faixa de custo de instalação semelhante, espera-se que as soluções da Tabela 4.4 superem as da Tabela 4.5. Isso demonstra como a busca por soluções sob diferentes condições de incerteza e funções de mérito caracteriza uma abordagem melhor do que apenas procurar soluções mais baratas sob a condição de demanda nominal.

No entanto, muitas simplificações e aproximações foram adotadas neste trabalho; alguns por falta de especialização, alguns por levar a complicações desnecessárias e outros por serem, por natureza, específicos da rede que está sendo otimizada. Embora seja uma convicção que nenhum destes prejudica a solidez da metodologia em si, eles dão muito espaço para melhorias e ajustes a serem feitos. Algumas ideias a serem consideradas estão listadas a seguir.

Ajuste de complexidade: o algoritmo é computacionalmente caro. Manter um conjunto de soluções candidatas requer que o MOGVNS resolva o problema do fluxo não linear inúmeras vezes.

Coleta de dados: muitos valores são aproximados neste trabalho. O crescimento da demanda adotado parece aceitável, mas certamente varia de caso para caso.

# Capítulo 5.

## Conclusões

*“Já que se há de escrever, que pelo menos não se esmaguem com palavras as entrelinhas.”*

— Clarice Lispector, 1920–1977

## Considerações Finais

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. Para auxiliar a tomada de decisão, os resultados obtidos foram avaliados em cinco critérios: custo de instalação, pressão mínima, taxa de factibilidade, custo médio de falhas e sensibilidade. A análise multicritério levou em consideração cenários de incerteza da evolução da demanda ao longo de um horizonte de tempo determinado (10 anos).

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 revisão atualizada apresenta no Capítulo 2; a modelagem multiobjetivo proposta para o problema (Capítulo 2); o VNS multiobjetivo dedicado ao problema, incluindo uma heurística construtiva inteligente (Capítulo 3); um gerador aleatório de instâncias para o problema, baseado no banco de dados da biblioteca TSPLIB (Capítulo 3); e uma estratégia de suporte à tomada de decisão multicritério, envolvendo-se os critérios: custo de instalação, pressão mínima, taxa de factibilidade, custo médio de falhas e sensibilidade (Capítulo 3).

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, conforme visto na Tabela 4.1. Esse fato tende a favorecer a busca local, uma vez que a solução inicial possivelmente já se encontra próxima de ótimos locais promissores. De forma geral, escolheu-se a heurística construtiva com  $\delta = 20\%$  por demandar baixo custo computacional e, além disso, apresentar valores razoáveis de custo de instalação e pressão mínima.

A partir de uma análise descritiva dos valores dos hipervolumes obtidos pelos algoritmos MORVNS, MOGVNS, NSGA-IIa e NSGA-IIb (Tabela 4.2), 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 possui o melhor desempenho dentre os algoritmos investigados. Mesmo sendo computacionalmente caro, o algoritmo MOGVNS consegue obter boas soluções considerando o custo computacional e a pressão mínima. Com isso, levando em consideração a investigação realizada, concluiu-se que o algoritmo de melhor desempenho foi o MOGVNS.

Pelos resultados obtidos (Capítulo 4) é possível observar que devido ao conflito dos objetivos entre o custo de instalação e a pressão mínima é importante avaliar a relação de compromisso entre as soluções estimadas. Nesse contexto, a análise multicritério proposta se mostrou muito eficiente para auxiliar no processo de tomada de decisão, pois auxilia com base em uma perspectiva de crescimento de demanda ao longo de 10 anos.

Analisar a qualidade das soluções utilizando um horizonte de tempo é outra premissa adotada que é considerada de suma importância. A instalação de uma rede de gás natural é uma obra grande e espera-se que dure por décadas antes de precisar de redimensionamento. Portanto, a análise de robustez de múltiplos objetivos oferece aos projetistas um bom nível de confiança de que o layout escolhido permanecerá operacional por um período considerável de tempo.

Há muitas maneiras de construir ou aperfeiçoar o procedimento proposto neste trabalho. Algumas possibilidades foram delineadas nas seções anteriores e em seguida propõe-se trabalhos que poderão dar continuidade.

Por fim, este procedimento, apesar de ser igualmente, ou ainda mais, capaz de encontrar soluções baratas 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.

## Propostas de Continuidade

Há muitas extensões em potencial para o que foi feito neste trabalho. Para trabalhos de continuidade sugere-se:

- Melhorar a eficiência dos algoritmos multiobjetivo utilizados, visando diminuir o tempo gasto em sua execução;
- Fazer uma nova investigação utilizando instâncias maiores, pois acredita-se que a diferença entre os algoritmos multiobjetivo ficará ainda mais evidente;
- Explorar critérios adicionais relacionados ao problema de dimensionamento de redes de gás natural;
- Análises não consideradas podem ser incluídas (por exemplo, custos de manutenção);
- Fontes adicionais de incerteza podem ser estudadas (por exemplo, rugosidade do tubo, taxa de fluxo de gás);

*“Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.”*

— Guimarães Rosa, 1908–1967



# Apêndice A.

## Estudo de caso

Tabela A.1.: Diâmetros disponíveis no mercado

Índice	Duto( $mm$ )	Custo ( $\$/m$ )
1	100	1637
2	150	1796
3	200	2122
4	250	2908
5	300	2940
6	400	4139

**Tabela A.2.:** Demanda nos nós interiores  $Q$ 

Nó	Demanda ( $m^3/h$ )
1	11500
2	11500
3	11500
4	11500
5	0
6	11500
7	8750
8	8750
9	0
10	8750
11	8750
12	12500

**Tabela A.3.:** Pressão nos nós fonte  $P$ 

Nó	Pressão ( $bar$ )
13	17,5
14	17,5

**Tabela A.4.:** Comprimento dos Dutos  $L$ 

Duto	Comprimento ( $m$ )
1	6300
2	8400
3	7700
4	9100
5	1400
6	6300
7	12600
8	3850
9	4900
10	1400
11	4900
12	4200
13	8400
14	1750
15	7700
16	5600
17	14700
18	17500
19	10500
20	15400
21	9100



# Referências

- Boyd, I. D., Surry, P. D. and Radcliffe, N. J. (1994). Constrained gas network pipe sizing with genetic algorithms, *Submitted to Parallel Problem Solving From Nature* .
- 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.
- Costa, W. E. (2004). *Um estudo algorítmico para o problema do dimensionamento de dutos em uma rede urbana de gás natural. dissertação de mestrado.*, Master’s thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal RN.
- 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.
- de Wolf, D. and Smeers, Y. (1996). Optimal dimensioning of pipe networks with application to gas transmission networks, *Operations Research* **44**(4): 596–608.
- 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.
- Duarte, H. M. (2006). *Um estudo algorítmico de problemas logísticos na indústria de petróleo e gás natural*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal RN.
- 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.
- Goldbarg, E. F. G., de Castro, M. P., Goldbarg, 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* pp. 1872–1883.
- Goulter, I. (1987). Current and future use of systems analysis in water distribution network design, *Civil Engineering Systems* **4**(4): 175–184.
- 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.
- Lemarechal, C., Strodiot, J.-J. and Bihain, A. (1981). On a bundle algorithm for nonsmooth optimization, *Nonlinear programming 4*, Elsevier, pp. 245–282.
- Miettinen, K. (2012). *Nonlinear multiobjective optimization*, Vol. 12, Springer Science & Business Media.
- Mladenović, N. and Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search, *Computers & operations research* **24**(11): 1097–1100.
- Mohajeri, A., Mahdavi, I. and Mahdavi-Amiri, N. (2012). Optimal pipe diameter sizing in a tree-structured gas network: a case study, *International Journal of Industrial and Systems Engineering* **12**(3): 346–368.
- Mohajeri, A., Mahdavi, I., Mahdavi-Amiri, N. and Tafazzoli, R. (2012). Optimization of tree-structured gas distribution network using ant colony optimization: A case study, *International Journal of Engineering* **25**(2): 141–158.

- Montgomery, D. C. and Runger, G. C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers*, third edn, Wiley.
- Nielsen, H. B. (1989). Methods for analyzing pipe networks, *Journal of Hydraulic Engineering* **115**(2): 139–157.
- Osiadacz, A. J. and Pienkosz, K. (1988). Methods of steady-state simulation for gas networks.
- 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.
- Scucuglia, J. W. (2006). *Sistema de controle de escoamento de gás natural em dutos de distribuição com detecção de vazamentos utilizando redes neurais*, PhD thesis, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- 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.
- Surry, P. D., Radcliffe, N. J. and Boyd, I. D. (1995). A multi-objective approach to constrained optimisation of gas supply networks: The comoga method, *AISB Workshop on Evolutionary Computing*, Springer, pp. 166–180.
- Torkinejad, M., Mahdavi, I., n. Mahdavi-Amiri and Seyed-Esfahani, M. (2018). Topology design and component selection in an urban gas network: Simultaneous optimization approach, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* **10**(1): 04018035.
- Tukey, J. W. (1953). The problem of multiple comparisons, *Multiple comparisons* .
- 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.