

## ANÁLISE MULTICRITÉRIO DO PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÕES DE REDES DE GÁS NATURAL SOB CONDIÇÕES DE INCERTEZA DA EVOLUÇÃO DA CARGA

### Multi-criteria analysis of the design of natural gas pipe size networks under load-evolution uncertainty

Lara Toledo Cordeiro (1); Lucas de Souza Batista (2)

(1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

(2) Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil

Email: [laratoledocordeiro@gmail.com](mailto:laratoledocordeiro@gmail.com) (P) Apresentadora; [lusoba@ufmg.br](mailto:lusoba@ufmg.br)

**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, este artigo 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. Apresenta-se uma ferramenta de otimização baseada na metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS), a qual busca encontrar não apenas uma estimativa da rede ótima global, mas um conjunto de redes localmente ótimas. Realiza-se simulações de Monte Carlo das condições futuras de carga, avaliando cada solução mapeada pela ferramenta de otimização em um conjunto de possíveis cenários de carga. As soluções são comparadas a partir de uma análise de dominância, considerando-se os critérios: custo de instalação, taxa de factibilidade, custo médio de falha e sensibilidade. 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. Os resultados indicam soluções relativamente distintas daquelas obtidos pelos engenheiros, apresentando redes mais robustas e seguras sob incertezas de evolução da carga.

*Palavras chaves:* planejamento de redes de gás natural; otimização do dimensionamento de tubulações; incertezas na evolução da carga; análise de sensibilidade multicritério; VNS.

**Abstract:** The natural gas has been used increasingly 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 pipeline installation, the design of these networks requires quality solutions, relating not only financial indicators but also reliability and security regarding the demand response. Thus, this paper



proposes an approach to the design of natural gas network under load evolution uncertainty in a time horizon. A predefined network topology is assumed with pipe diameters as the design variables. An optimization tool based on the Variable Neighborhood Search (VNS) metaheuristic is presented, which seeks to find not only an estimate of the optimal global network, but a set of locally optimal networks. A Monte-Carlo simulation of the future load conditions is performed, evaluating each solution within a set of other possible scenarios. A dominance analysis is performed to compare the candidate solutions, considering the objectives of smaller installation cost, smaller feasibility rate, smaller mean fault-cost and smaller sensitivity. 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 results indicate solutions relatively different from those obtained by engineers, presenting more robust and safer networks under load evolution uncertainties.

**Keywords:** *natural gas network planning; pipe size optimization; load-evolution uncertainty; multi-criteria sensitivity analysis; VNS.*



## 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 (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, com expectativa de crescimento médio em torno de 2,0% ao ano até 2035 segundo dados de (U.S. Energy Information Administration, 2011).

Existem essencialmente três tipos principais de tubulações ao longo das linhas de transporte, variando em tamanho de 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 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 (Mercado et al., 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 tubulação de gás. Tradicionalmente, a pesquisa de dimensionamento de tubos 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 (Claus et al., 1991), programação dinâmica (Behrooz et al., 2017) e algoritmos evolutivos (AEs) (El-Mahdy et al., 2010; Goldbarg et al., 2004). Entretanto, esses estudos são limitados, pois visam apenas a minimização de custo da rede, desconsiderando aspectos relevantes de projeto, tais como confiabilidade e robustez da rede.

Nesse sentido, este trabalho propõe uma ferramenta de otimização mono-objetivo dedicada ao projeto do dimensionamento de redes de gás. Esta ferramenta, baseada na metaheurística VNS, é capaz de estimar não apenas a solução ótima de menor custo, mas mapear um conjunto de soluções (ótimos locais) de interesse prático. Além disso, propõe

uma análise multicritério dessas soluções considerando cenários de incerteza da evolução da demanda. De forma geral, as soluções candidatas são investigadas considerando-se os seguintes critérios: custo de instalação, taxa de factibilidade, custo médio de falha e sensibilidade. Esta abordagem é aplicada a um estudo de caso real, e os resultados são comparados aos apresentados por três engenheiros de uma companhia de gás, com média de seis anos de experiência. De forma geral, os resultados obtidos com a abordagem proposta apresentam redes mais robustas e seguras sob incertezas de evolução da carga.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 apresenta-se a definição do problema e sua modelagem. Na seção 3, a ferramenta de otimização é definida juntamente com os seus parâmetros de controle. Já na seção 4, é apresentada a análise multicritério proposta neste trabalho. Na seção 5 apresenta-se o estudo de caso utilizado. A análise dos resultados obtidos é apresentada na seção 6. Finalmente, na seção 7 são apresentadas as conclusões.

## 2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O projeto de dimensionamento de uma rede de gás natural envolve dois subproblemas: hidráulico e mecânico. A parte hidráulica do problema envolve questões como: a demanda a ser atendida, a topologia da rede, os critérios de pressão máximas e mínimas 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 tubos adequado para resistir a pressão interna e externa (da Silva, 2008).

O problema de dimensionamento de tubos abordado neste trabalho é referente ao dimensionamento hidráulico para uma topologia predefinida. A rede é formada por  $n + r$  nós e  $m$  tubos. Os nós  $(1, \dots, n)$  são os nós internos de demanda e os nós  $(n + 1, \dots, n + r)$  são os nós associados as fontes. Cada tubo possui um tamanho  $L_i$ .

Dada uma rede com  $r$  nós fontes,  $n$  nós internos e  $m$  tubos, as informações de entrada da rede são: topologia da rede, tamanho de cada tubo  $L = [L_1, \dots, L_m](m)$ , diâmetro de cada tubo  $D = [d_1, \dots, d_m](mm)$ , demanda nos nós internos  $Q = [Q_1, \dots, Q_n](m^3/h)$ , pressão nos nós das fontes  $P = [P_1, \dots, P_r](bar)$ . A pressão do sistema de transmissão de gás natural não pode ser menor que a pressão mínima permitida na rede, que é um valor constante de projeto relacionado ao atendimento de demanda da rede.

As saídas são definidas como: taxa de fluxo nos tubos  $q = [q_1, \dots, q_m](m^3/h)$  e a pressão nos nós internos  $p = [p_1, \dots, p_n](bar)$ . De forma geral, neste trabalho deseja-se obter o 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.

A formulação matemática do problema de otimização é apresentado a seguir:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} L_i C_k x_{ik} \quad (1)$$

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;  $I$  o conjunto de dutos pré-definidos na rede;  $L_i$  o comprimento do  $i$ -ésimo tubo 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.

A obtenção da pressão  $P_j$  nos nós da rede (Eq. (4)) envolve diversas simplificações, tais como: eficiência do duto, fator de fricção, gravidade específica do gás, temperatura média e temperatura de base e fator de compressibilidade (de Castro, 2004). Não há uma fórmula única para descrever o fluxo de gás em um gasoduto. As diferentes equações são usadas dependendo da pressão de trabalho da rede e das suposições feitas com relação às condições da operação da rede (Nielsen, 1989). Para este trabalho a equação do fluxo é dada por:

$$\Delta P_i(x) = \left( \frac{18.43}{0.92} \right) \left( \frac{L_i |q_i(x)|^{0.845} q_i(x)}{D_i(x)^{4.854}} \right) \quad (4)$$

A função objetivo considerada na ferramenta de otimização foi representada conforme a Eq. (5), onde a restrição do problema é tratada via uma função de penalidade.

$$F(x) = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} L_i C_k x_{ik} + n(x) (\max_{k \in K} C_k - \min_{k \in K} C_k) \sum_{i \in I} L_i \quad (5)$$

em que  $n(x)$  é o número de nós da solução  $x$  que violam a pressão mínima requerida;  $x_{ik}$  uma variável binária, sendo 1 se o  $k$ -ésimo diâmetro é atribuído ao tubo  $i$ , e 0 caso contrário.

### 3 FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTA

Devido à complexidade do problema abordado, metaheurísticas são recomendadas para procurar boas soluções em tempos computacionais razoáveis (Liao et al., 2007). Neste trabalho, para a solução do problema aplicou-se uma metaheurística *variable neighborhood search* (VNS) (Fig. 1). Nesse pseudocódigo,  $s_0$  representa uma solução inicial para o problema,  $r$  o número de estruturas de vizinhança considerado, e  $N^k(\cdot)$  a  $k$ -ésima estrutura de vizinhança.

O VNS, proposta por (Mladenovic et al., 1997), é uma metaheurística que explora o espaço de soluções realizando uma sequência de buscas locais por meio de trocas sistemáticas entre as estruturas de vizinhança pré ordenadas. A ideia principal deste algoritmo é efetuar buscas no espaço de solução com duas ou mais estruturas de vizinhança, o que permite escapar de ótimos locais (Liu et al., 2013; Liao et al., 2007).

Uma convergência adequada das metaheurísticas baseadas em vizinhança depende de uma solução inicial de boa qualidade e das estruturas de vizinhanças utilizadas (Coelho, 2016). Neste sentido, os componentes do algoritmo VNS proposto neste trabalho são descritos a seguir.

```

Entrada:  $s_0, r$ 
Saída:  $s, f$ 
início:
   $s = s_0;$ 
  enquanto (critério de parada não for satisfeito) faça:
     $k = 1;$ 
    enquanto ( $k \leq r$ ) faça:
      Gere um vizinho qualquer  $s' \in N^k(s)$ :
       $s'' = BuscaLocal(s');$ 
      se ( $f(s'') < f(s)$ ) então:
         $s = s'';$ 
         $k = 1;$ 
      senão
         $k = k + 1;$ 
      fim
    fim
  fim
  Retorne  $s$  e  $f$ ;
fim

```

Figura 1. Pseudo-Código VNS.

Fonte: Adaptado de (Coelho, 2016).

### 3.1 Solução Inicial

A solução inicial do problema foi gerada utilizando uma função de probabilidade conforme o custo dos diâmetros. De forma geral, a cada duto da rede atribui-se um diâmetro com uma certa probabilidade. Os valores dessas probabilidades são arbitrários e sua investigação não compõe o escopo desse trabalho. Nesse artigo considerou-se seis tipos de dutos disponíveis no mercado (Tab. 1).

Tabla 1. Diâmetros disponíveis no mercado e sua probabilidade de escolha

Índice	Diâmetro(mm)	Custo (\$/m)	Probabilidade
1	100	1637	40%
2	150	1796	25%
3	200	2122	20%
4	150	2908	9%
5	300	2940	5%
6	400	4139	1%

Esse processo para geração de uma solução inicial é repetido vinte vezes e a solução final escolhida como solução inicial do VNS é a de menor custo, conforme a Eq. (5).



## 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 milhões de dólares. Portanto, optou-se por estruturas de vizinhanças com perturbações pequenas. As três estruturas de vizinhanças implementadas foram:

- Troca do valor de diâmetro de um tubo escolhido aleatoriamente para um diâmetro com valor imediatamente inferior, com exceção do diâmetro de índice 1.
- Troca dos valores de diâmetros de dois dutos vizinhos, escolhidos aleatoriamente.
- Troca dos valores de diâmetros de dois dutos arbitrários, escolhidos aleatoriamente.

## 3.3 Busca Local

A busca local no VNS foi implementada utilizando uma heurística de refinamento. Neste trabalho é usada a heurística Variable Neighborhood Descent (VND) proposta por (Mladenovic et al., 1997). Na heurística VND, o espaço de soluções é explorado por meio de trocas de estrutura de vizinhança, sendo aceitas somente soluções que apresentam melhoria em relação à solução atual. Utilizou-se a heurística de refinamento First Improvement, ou método de primeira melhora. O pseudocódigo do VND é apresentado na Fig. 2.

---

**Entrada:**  $f(\cdot), N(\cdot), r, s$   
**Saída:**  $s$   
**início**

```

|  $k = 1$ ; /* estrutura de vizinhança atual
| enquanto ( $k \leq r$ ) faça
|   Encontre o melhor vizinho  $s' \in N^k(s)$ ;
|   se ( $f(s') < f(s)$ ) então
|     |  $s = s'$ ;
|     |  $k = 1$ ;
|   senão
|     |  $k = k + 1$ ;
|   fim
| fim
| Retorne  $s$ ;
```

**fim**

---

Figura 2. Pseudo-Código VND.

Fonte: Adaptado de (Coelho, 2016).

## 4 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A análise multicritério foi realizada considerando cenários de incerteza de evolução de carga. 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 horizonte de tempo.

O procedimento de análise proposto é o seguinte:

1. Para um período de tempo específico, gere um conjunto de  $N_s$  cenários de demanda usando uma distribuição Gaussiana.
2. Avalie todas as soluções candidatas (configurações de rede) em todos os cenários, avaliando quatro funções de mérito pré estabelecidas: custo de instalação; taxa de viabilidade; custo de falha médio; sensibilidade.
3. Realize uma análise de dominância: 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  $i = 1, \dots, n_c$ , e existe pelo menos um critério  $i$  em que  $f_i(x_1) < f_i(x_2)$  (Miettinen, 1999). Nessa definição,  $f_i(\cdot)$  representa um dado critério de minimização e  $n_c$  o número total de critérios considerados. Com isso é possível extrair um subconjunto de soluções não-dominadas a partir do conjunto inicial de soluções candidatas.

As funções de mérito pré estabelecidas são modeladas a seguir.

### 4.1 Custo de instalação ( $f_1$ )

Essa função se trata dos custos que envolvem, principalmente, obras civis, aquisição de equipamentos de controle de pressão, medidores de vazão e tubos (Goldberg, 2004). Neste trabalho, o custo de instalação é:

$$f_1 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} L_i C_k x_{ik} \quad (6)$$

### 4.2 Taxa de factibilidade ( $f_2$ )

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 ( $N_s$ ):

$$f_2 = \frac{N_f}{N_s} \quad (7)$$

### 4.3 Custo médio de falha ( $f_3$ )

A função  $f_3$  representa o custo médio de falha esperado na rede, o qual é avaliado para cada cenário em que a rede é viável:

$$f_3 = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} y_j \quad (8)$$



sendo,

$$y_j = \mu \sum_{i=1}^m \lambda_i t_i q(i, j) \quad (9)$$

em que,  $\mu = 0,10 (\$.h/m^3)$ ,  $\lambda_i = 10^{-4} ((m.h)^{-1})$ ,  $t_i = 1(h)$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

#### 4.4 Sensibilidade ( $f_4$ )

A sensibilidade permite avaliar como é esperado que a rede se comporte caso algum duto tenha um mal funcionamento. O caso adotado neste trabalho é o de remoção completa de um dado duto.

Para cada duto removido, a sensibilidade é dada por:

$$f_4 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{N_a} \sum_{j=1}^n \Omega_j^i \right) \quad (10)$$

em que:

$$\Omega_j^i = \begin{cases} 0, & \text{se } p_j^i \geq p_{min} \\ (p_{min} - p_j^i)^2, & \text{se } p_j^i < p_{min} \end{cases} \quad (11)$$

sendo  $N_a$  o número de nós que não violam a restrição de pressão mínima.

## 5 ESTUDO DE CASO

A instância utilizada neste trabalho 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 na Fig. 3.

Informações adicionais necessárias para a análise de estado estacionário da rede são apresentadas nas tabelas a seguir: comprimento dos tubos (L) (Tab. 2), demanda nos nós interiores (Q) (Tab. 3), pressão nos nós fonte (P) (Tab. 4) e diâmetros de tubulação (D)(Tab.1).

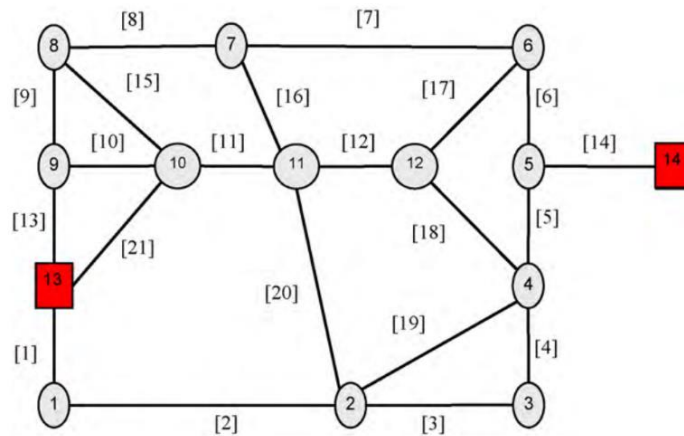


Figura 3. Estudo de Caso.

Fonte: Adaptado de (El-Mahdy et al 2010).

Tabela 2. Comprimento dos tubos (L)

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

Tabela 3. Demanda nos nós interiores (Q)

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

Tabela 4. Pressão nos nós fonte (P)

Nó	Pressão (bar)
(13)	17,5
(14)	17,5

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Resultados da Literatura

A Tab. 5 resume os resultados encontrados pelo trabalho desenvolvido em (El-Mahdy et al., 2010) e pelos três engenheiros citados no mesmo trabalho. O ganho em redução de custo alcançado por (El-Mahdy et al., 2010) é notável (mais de 10 milhões de dólares em comparação com qualquer engenheiro).

**Tabela 5. Soluções obtidas de (El-Mahdy et al 2010)**

Referências da literatura	Custo (\$)
El-Mahdy et al. 2010	289700950
Engenheiro A	300276200
Engenheiro B	324824500
Engenheiro C	301744450

Avaliando-se as soluções da Tab. 5 nos quatro critérios definidos anteriormente, tem-se os valores das funções custo de instalação, taxa de factibilidade, custo médio de falha e sensibilidade apresentados na Tab. 6.

**Tabela 6. Soluções de (El-Mahdy et al 2010) avaliadas nos critérios propostos**

Solução	Referência	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
1	El-Mahdy	289700950	1,30%	$1,2946 * 10^4$	$1,5530 * 10^5$
2	Engenheiro A	300276200	1,30%	$1,2832 * 10^4$	$8,7511 * 10^4$
3	Engenheiro B	324824500	1,11%	$1,2809 * 10^4$	$5,0893 * 10^6$
4	Engenheiro C	301744450	2,45%	$1,2757 * 10^4$	$1,0678 * 10^6$

### 6.2 Resultados Obtidos pela Abordagem Proposta

A partir da otimização realizada pelo VNS foram estimadas 40 soluções ótimas-locais. O parâmetro usado no VNS como critério de parada foi definido como 100 iterações. O algoritmo VNS levou aproximadamente 3 minutos para ser executado com um processador Intel Core i3 6006U (2,0 GHz), enquanto o tempo computacional obtido por El-Mahdy et al. (2010) foi de aproximadamente 8 minutos em um processador IBM ThinkPad Pentium IV.

A partir da análise de dominância realizada com os critérios definidos (custo de instalação, taxa de factibilidade, custo médio de falha e sensibilidade), foram obtidas 26 soluções não-dominadas. Dentre estas, 13 são apresentadas na Tab. 7, as quais foram escolhidas por apresentarem maior diversidade em relação aos valores dos critérios.

**Tabela 7. Soluções não-dominadas**

Solução	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
1	284584300	1,45%	$1,2285 * 10^4$	$2,5588 * 10^6$
2	286756400	1,30%	$1,2495 * 10^4$	$1,5748 * 10^6$
3	286684300	1,55%	$1,2396 * 10^4$	$2,8714 * 10^6$
4	288629250	1,60%	$1,2648 * 10^4$	$4,7816 * 10^4$
5	289241400	1,70%	$1,2675 * 10^4$	$4,7878 * 10^4$
6	289319450	1,55%	$1,2655 * 10^4$	$4,2571 * 10^4$
7	289575300	3,25%	$1,3140 * 10^4$	$3,2340 * 10^4$
8	290153500	3,90%	$1,3018 * 10^4$	$5,6992 * 10^7$
9	290675700	3,55%	$1,3148 * 10^4$	$2,8742 * 10^4$
10	294830200	15,45%	$1,4210 * 10^4$	$5,7295 * 10^3$
11	296085300	16,20%	$1,4288 * 10^4$	$4,2763 * 10^3$
12	312502750	17,00%	$1,4960 * 10^4$	$1,3757 * 10^3$
13	321762000	69,05%	$16706 * 10^4$	$3,4913 * 10^4$

Para este estudo de caso foram amostrados 2000 cenários de incerteza em um horizonte de tempo de 10 anos. A taxa de crescimento médio da demanda foi considerada a mesma em todos os nós da rede. 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. Vale enfatizar que esses dados foram escolhidos apenas para ilustrar a abordagem; do ponto de vista prático, diferentes distribuições de probabilidade podem ser consideradas para cada nó de demanda da rede.

Nas primeiras linhas da Tab.7 são mostradas as soluções de menor custo obtidas. É notável que o VNS conseguiu encontrar 7 soluções candidatas, não-dominadas, de menor custo que as existentes na literatura utilizada como referência para este trabalho.

Como pode ser visto, as soluções 4,5,6 da Tab.7 obtiveram resultados com menor custo de instalação, apresentam maior factibilidade considerando-se as incertezas de demanda de carga em um horizonte de 10 anos, obtiveram menor valor de custo de falha e uma menor sensibilidade se comparada com as soluções 1,2 e 3 da Tab. 6. Esses resultados evidenciam a necessidade de uma análise multicritério do problema em questão e indicam a abordagem proposta como uma ferramenta promissora de suporte à tomada de decisão.

## 7 CONCLUSÃO

O trabalho proposto se mostrou eficiente nos dois contextos investigados. A otimização mono-objetivo do custo de instalação alcançou resultados melhores que aqueles apresentados no trabalho utilizado como referência da literatura (El-Mahdy et al.,



2010). Além disso, a análise multicritério permitiu identificar soluções de melhor compromisso prático, tornando o processo de tomada de decisão mais assertivo e seguro.

De forma geral, destaca-se que além de encontrar soluções com baixo custo, é necessário identificar soluções robustas às incertezas de demanda, que se mantenham funcionais ao longo de um determinado horizonte de tempo.

Em trabalhos de continuidade, pretende-se realizar uma otimização verdadeiramente multiobjetivo, visando simultaneamente minimizar o custo de instalação da rede e maximizar a pressão mínima observada nos nós. Além disso, tem-se em mente explorar critérios adicionais de qualidade da rede e a aplicação de técnicas de auxílio à tomada de decisão.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio das agências de fomento brasileiras Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- Behrooz, H. A., Boozarjomehry, R. B., 2017. Dynamic optimization of natural gas networks under customer demand uncertainties. *Energy* 134 pp. 968-983.
- Chebouba, A., Yalaoui, F., Smati, A., Amodeo, L., Younsi, K., Tairi, A., 2009. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization, *Computers and Operations Research* 36 pp. 1916-1923.
- Coelho, D., 2016. Estruturas de Memória e Operadores Adaptativos em Meta-Heurísticas, Tese de Doutorado. UFMG - PPGEE.
- Da Silva, W. C., 2008. Um Estudo do Problema de Dimensionamento de Dutos de Gás, Dissertação de Mestrado. UFRJ - COPPE.
- De Castro, M. P., 2004. Algoritmos Evolucionários para o Problema de Dimensionamento dos Dutos de uma Rede Urbana de Distribuição de Gás Natural, Dissertação de Mestrado. UFRN - PPGSC
- El-Mahdy, O. F. M., Ahmed, M. E. H., Metwalli, S., 2010 Computer aided optimization of natural gas pipe networks using genetic algorithm, *Applied Soft Computing* 10 pp. 1141-1150.
- Goldberg, E. F. G., Castro, M. P., Goldberg, M. C., 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.



- 
- Hansen, C. T., Madsen, K., Nielsen, H. B., 1991. Optimization of pipe networks, *Mathematical Programming* 52 pp. 45-52.
- Liao, C. J., Cheng, C. C., 2007. A variable neighborhood search for minimizing single machine weighted earliness and tardiness with common due date, *Computers and Industrial Engineering*. vol.52 pp. 404-413.
- Liu, L., Zhou, H., 2013. Hybridization of harmony search with variable neighborhood search for restrictive single-machine earliness/tardiness problem, *Information Sciences*. vol. 226 pp. 68-92.
- Mercado, R. Z. R., Sanchez, C. B., 2015. Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review. *Applied Energy* 147 pp. 536-555.
- Miettinen K., 1999. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. 1st ed.; volume 12 of *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer US.
- Mladenovic, N., Hansen, P., 1997. Variable neighborhood search, *Computers and Operations Research*. vol. 24 pp.1097-1100.
- NaturalGas.Org Web Site. Disponível em: <<http://naturalgas.org/>> . Acesso em: 04 de março de 2018.
- Nielsen, H. B., 1989. Methods for analyzing pipe networks, *Journal of Hydraulic Engineering* pp. 139-157.
- U.S. Energy Information Administration. *International energy outlook 2011*. Technical report DOE/EIA-0484(2011), EIA, Office of Communication. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2011\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2011).pdf)>. Acesso em: 27 de agosto de 2018.