

## **AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NO DIMENSIONAMENTO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE GÁS PREDIAL**

**Laerte dos Santos Apolinário Júnior<sup>1</sup>**

**Guilherme Bampi Righeto<sup>2</sup>**

**Resumo:** O dimensionamento das tubulações de redes de distribuição de gás se baseiam, na maioria dos casos, na norma NBR 15.526 ou na instrução normativa nº8. Porém essas normas sugerem duas maneiras distintas para o dimensionamento das tubulações de gás. Com o objetivo de avaliar a influência de condições dimensionais na vazão volumétrica, para as redes primárias e secundárias das redes de distribuição de gás e, assim, comparar os valores obtidos com a normatização vigente, o presente estudo observou que, ao aplicar as equações ajustadas originadas de experimentos em um projeto existente, foi observada a redução na maioria dos diâmetros das tubulações, o que gera impacto direto nos custos do projeto. Através dos métodos experimentais, concluiu-se que em 86,04 % dos casos o diâmetro pode ser definido pela pressão manométrica, comprimento linear de tubulação e vazão volumétrica, para as redes primárias, e em 83,01 % para as redes secundárias. A redução do diâmetro calculado de acordo com os experimentos, foi de até 60 % no tamanho dos diâmetros para as redes primárias, e de 16,01 % para as redes secundárias, quando comparados com projeto pré-existente, evidenciando assim, a importância de dados experimentais para o dimensionamento de redes de distribuição de gás.

**Palavras-chave:** Dimensionamento de redes de gás. GLP. Projeto de rede predial. Gás Natural.

### **1 INTRODUÇÃO**

O Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), popularmente chamado de gás de cozinha, possui queima bastante limpa, o que resulta em uma emissão mínima de poluentes, fazendo com que seu uso seja mais seguro, em comparação a outras fontes de calor. De acordo com as últimas pesquisas realizadas em âmbito nacional, 91 % das famílias brasileiras utilizam gás para cozinhar (IBGE, 2019).

Apesar de ser considerado um combustível seguro, ainda assim, por se tratar de uma mistura gasosa com um alto potencial de queima, é necessário o

---

<sup>1</sup> Graduando em curso, 202x. E-mail:

<sup>2</sup> Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail:



contínuo estabelecimento de normas de segurança para projeto e instalação. O decreto nº 24.714, publicado pela prefeitura da cidade de São Paulo, em outubro de 1987, deu início a outras normas referentes à instalação de gás residencial no Brasil. Infere-se, da leitura do mencionado decreto, que a maior preocupação dos governantes com a normatização do uso do GLP fora a falta de conscientização e de conhecimento da população, aliado ao escasso controle de qualidade dos equipamentos, o que vinha gerando inúmeros acidentes.

Hoje em dia, as empresas de Santa Catarina especializadas em projetos de tubulações de gás em edifícios residenciais se baseiam, na maioria dos casos, na norma NBR 15.526 de 2016 ou na instrução normativa nº8 (IN nº8, 2018; NBR 15.526, 2016). Porém essas normas sugerem duas maneiras distintas para o dimensionamento das tubulações de gás. Existem autores que realizam os cálculos e adotam o maior diâmetro encontrado, porém existem autores que adotam bitolas diferentes por trecho, tanto nas tubulações das redes primárias quanto nas tubulações das redes secundárias.

Deve se buscar compreender a adoção de diferentes parâmetros no cálculo de dimensionamento de redes de distribuição de gás que, geralmente, está atrelada ao dimensionamento mais econômico, mas que também vise a segurança dos envolvidos, de acordo com as normas vigentes.

Ou seja, há uma busca por projetos mais econômicos na área da construção civil, pois, comumente existe o gasto excessivo por superdimensionamento de tubulações ou o mau funcionamento de equipamentos devido ao subdimensionamento das tubulações. Para evitar isso, deve-se entender sobre o consumo de gás e o dimensionamento correto das tubulações levando em consideração o uso das normas técnicas adequadas, e também a elaboração de projetos menos dispendiosos.

Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência de condições dimensionais, como o diâmetro do tubo e comprimento total, na vazão volumétrica, para as redes primárias e secundárias de gás, assim como avaliar o impacto do gradiente de pressão nesta variável. Deste modo, comparar os valores obtidos com a normatização vigente, sendo possível reduzir custo de implantação de redes de gás, por meio do correto dimensionamento das redes.

## **2 REDES DE ABASTECIMENTO DE GÁS PREDIAL – PROJETO E EXECUÇÃO**

No Brasil, desde 1974, existe o Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Gás Liquefeito de Petróleo, a Sindigás, que é uma entidade responsável pelo estudo, coordenação, proteção e representação desta categoria perante a sociedade brasileira.

Atualmente, a norma NBR 15.526 de 2016, rege os padrões para projeto e execução das redes de distribuição interna para gases combustíveis em instalações residências, a nível nacional. Dentro da norma ficam elencados quais os padrões de segurança que devem ser obedecidos para o projeto e a execução de redes de gás residencial, comercial ou outras localidades que possuam em seu interior aparelhos que consomem gás, desde que não ultrapassem as pressões de operação de 150,0417 kPa (1,53 kgf/cm<sup>2</sup>), para redes de gás GLP e redes de gás mistura ar – GLP (NBR 15.526, 2016).

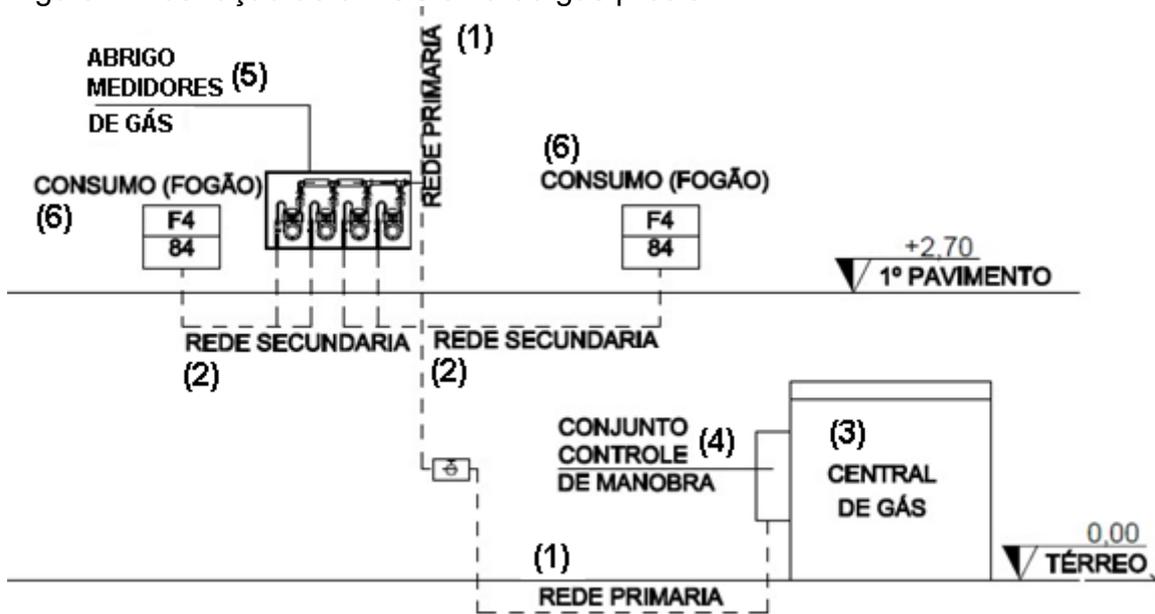
Em Santa Catarina, estabeleceu-se a Instrução Normativa nº 8, que tem por objetivo estabelecer e padronizar critérios de concepção e dimensionamento da Instalação de Gás Combustível (IGC), como forma de segurança contra incêndio, em processos que serão analisados e fiscalizados pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (IN nº8, 2018).

Estas normativas apresentam diversas obrigações e recomendações que devem ser seguidas para a instalação de uma rede de gás, inclusive um projeto preventivo contra incêndio de gás. Dentre essas recomendações se encontram os tipos de tubulações, tipos de aparelhos de limitação e controle, pressões máximas e mínimas permitidas, entre outras obrigatoriedades.

### **2.1 SISTEMA DE GÁS PREDIAL**

De acordo com a Fig. 1, os projetos de instalações de gás predial são divididos em setores distintos.

Figura 1: Ilustração de um sistema de gás predial.



Fonte: Do Autor (2023).

Chama-se de Rede de Gás Primária, o conjunto de tubulações, conexões e acessórios compreendidos entre o regulador de primeiro estágio e o regulador de segundo estágio, localizado no abrigo de medidor, que tem como objetivo o transporte do combustível da central até o regulador de segundo estágio (FDE, 2009) (Fig. 1-1).

Entre o regulador de segundo estágio e o ponto de consumo está compreendida a Rede Secundária, que é formada por um conjunto de tubulações, conexões e acessórios (FDE, 2009) (Fig. 1-2).

A Central de Gás, conforme estabelece a NBR 13.523 de 2019, corresponde a uma área determinada para o armazenamento dos recipientes e acessórios utilizados para o depósito e a conservação do GLP, bem como seus equipamentos necessários para o consumo interno da edificação (Fig. 1-3).

O Conjunto de Controle e Manobra, conforme apresenta a Fig. 1-4 é um equipamento que integra a Central de Gás, sendo utilizado para fazer a primeira regulagem de pressão (regulador de 1º estágio). De acordo com a Instrução Normativa 008, que prescreve as normas para a instalação de GLP, a pressão máxima após a válvula reguladora de 1º estágio deve ser de, no máximo, 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> (IN n°8, 2018).

Medidor de Gás é o equipamento que faz o registro do volume de gás utilizado em cada residência (Fig. 1-5), já o Regulador de Segundo Estágio é o



responsável pela regulagem do gás ao entrar na unidade habitacional, regulador de 147,1 kPa x 19,6133 kPa (1,5 kgf/cm<sup>2</sup> x 0,200 kgf/cm<sup>2</sup>).

Todo o mecanismo explicitado anteriormente serve para a condução do combustível de uma forma segura até o seu destino, ou melhor, até os Pontos de Consumo. Levam essa nomenclatura todos os aparelhos movidos a gás e que se encontram dentro das unidades atendidas pela rede de gás, conforme ilustra a Fig. 1-6.

## 2.2 DIMENSIONAMENTO DE REDES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS

Para que se possa estabelecer qual o consumo máximo instantâneo de cada unidade, deve-se levar em consideração a potência nominal dos aparelhos a gás, podendo essa média ser calculada em kW e também em kcal/h.

Para o dimensionamento das bitolas das tubulações das redes primárias e secundárias é utilizada a norma NBR 15.526, que define uma sequência de cálculos a serem feitos.

### 2.2.1 Fator de simultaneidade

O fator de simultaneidade corresponde a uma taxa provável do uso simultâneo dos pontos de consumo, ele é utilizado para o dimensionamento dos diâmetros das tubulações e também da central de gás. O fator de simultaneidade é obtido através das Eq. 1, 2, 3 e 4 em kcal/h.

Segundo a norma NBR 15.526 o fator de simultaneidade não se aplica ao dimensionamento de uma unidade domiciliar, não se aplica a comércio e não se aplica a trechos que alimentem um único aparelho.

Para valores de C abaixo de 21.000, o F é considerado igual a 100 e, para valores de C menores que 1.200.000, o F é considerado igual a 23.

Nas seguintes equações (Eq. 1 e 2) são apresentadas as condições do fator de simultaneidade para os demais casos.

$$21.000 \leq C < 576.720 \quad (1)$$



$$F = \frac{100}{\left[1 + 0,001 \left(\frac{C}{60} - 349\right)^{0,8712}\right]}$$

$$576.720 \leq C < 1.200.000$$

$$F = \frac{100}{\left[1 + 0,4705 \left(\frac{C}{60} - 1055\right)^{0,19931}\right]} \quad (2)$$

### 2.2.2 Potência adotada

A potência adotada (A) se relaciona com o fator de simultaneidade por meio da Eq. 3.

$$A = C \cdot \frac{F}{100} \quad (3)$$

### 2.2.3 Cálculo da vazão adotada

A vazão adotada (Q) se relaciona com o poder calorífico do gás (PCI) e a potência adotada (A) por meio da Eq. 4.

$$Q = \frac{A}{PCI} \quad (4)$$

### 2.2.4 Cálculo da variação da pressão

Em trechos verticais deve se considerar uma variação da pressão em que, quando utilizado gás liquefeito de petróleo (GLP) temos um ganho de pressão nos trechos descendentes e uma perda de pressão nos trechos ascendentes. Essa variação da pressão é calculada através da Eq. 5.

$$\Delta P = 1,318 \cdot 10^{-2} \cdot H(S - 1) \quad (5)$$

De acordo com a equação de *Darcy-Weisbach*, Eq. 6, o efeito do aumento da taxa de fluxo de gás está relacionado com o atrito, a pressão da rede, o diâmetro e comprimento da tubulação (AGWU; MARKSON; UMANA, 2016).



$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = f \frac{L Q^2}{D 2g A_*^2} \quad (6)$$

A Eq. 7 apresenta a equação de *Bernoulli*, que indica a perda de carga em um trecho da tubulação, desprezando a diferença de altura (LOPEZ, 2019).

$$P_A^2 - P_B^2 = \frac{f \cdot L \cdot V^2}{D} \cdot \rho \cdot \frac{T}{T_n} \cdot P_n \cdot Z \quad (7)$$

### 2.2.5 Cálculo dos diâmetros das tubulações

Diversas equações foram desenvolvidas para serem utilizadas no dimensionamento de tubulações de gás envolvendo situações de baixa, média e alta pressão, tais como: Equação de pole, Equação de *Panhandle A*, Equação de *Panhandle B*; Equação de *Weymouth*, dentre outras. No entanto essas equações não representam com precisão o comportamento do gás nos gasodutos (MORAIS; LIMA, 2005).

E a equação de *Weymouth* (Eq. 8, 9, 10 e 11) é considerada a mais adequada para fluxo de gás em tubulações com diâmetros de até 381 mm (15 polegadas), para segmentos de tubulações com menos de 32186,9 m (20 milhas) de comprimento, e para pressões, de aproximadamente, entre 689,476 kPa (100 psia) e 6894,76 kPa (1.000 psia). O fluxo normalmente é considerado isotérmico nesse caso (BENGTSON, 2019).

Bengtson (2019) ao comparar diferentes equações, observou que as Equações de *Darcy* e *Weymouth* apresentaram resultados semelhantes.

$$Q_* = 433,49 \left( \frac{T_b}{P_b} \right) \left( \frac{P_1^2 - e^s P_2^2}{G T_f L_e Z} \right) D_*^{8/3} \quad (8)$$

$$L_e = \frac{L'(e^s - 1)}{s} \quad (9)$$

$$s = 0,0375G \left( \frac{\Delta H}{T_f Z} \right) \quad (10)$$

$$Z = \frac{1}{1 + \frac{P_1 344400 (10)^{1,785G}}{T_f^{3,825}}} \quad (11)$$

Em alguns casos, alguns autores adotam diversos diâmetros das tubulações para as redes primárias e secundárias, considerando os cálculos de trecho a trecho das redes. Já outros autores, realizam os cálculos por trechos, mas adotam apenas um valor de diâmetro para toda rede primária e outro valor para a rede secundária, sendo esta considerada a situação crítica. É sugerido, pela praticidade, segurança na execução da rede e conforto dos usuários, que os projetistas adotem o dimensionamento pela situação crítica (MINATTO JUNIOR; DELLA; 2014).

A NBR 15.526 também estabelece padrões para o dimensionamento dos diâmetros das tubulações em diferentes pressões, sendo a Eq. 12, para pressões acima de 7,5 kPa GLP, e a Eq. 13 para pressões até 7,5 kPa GLP.

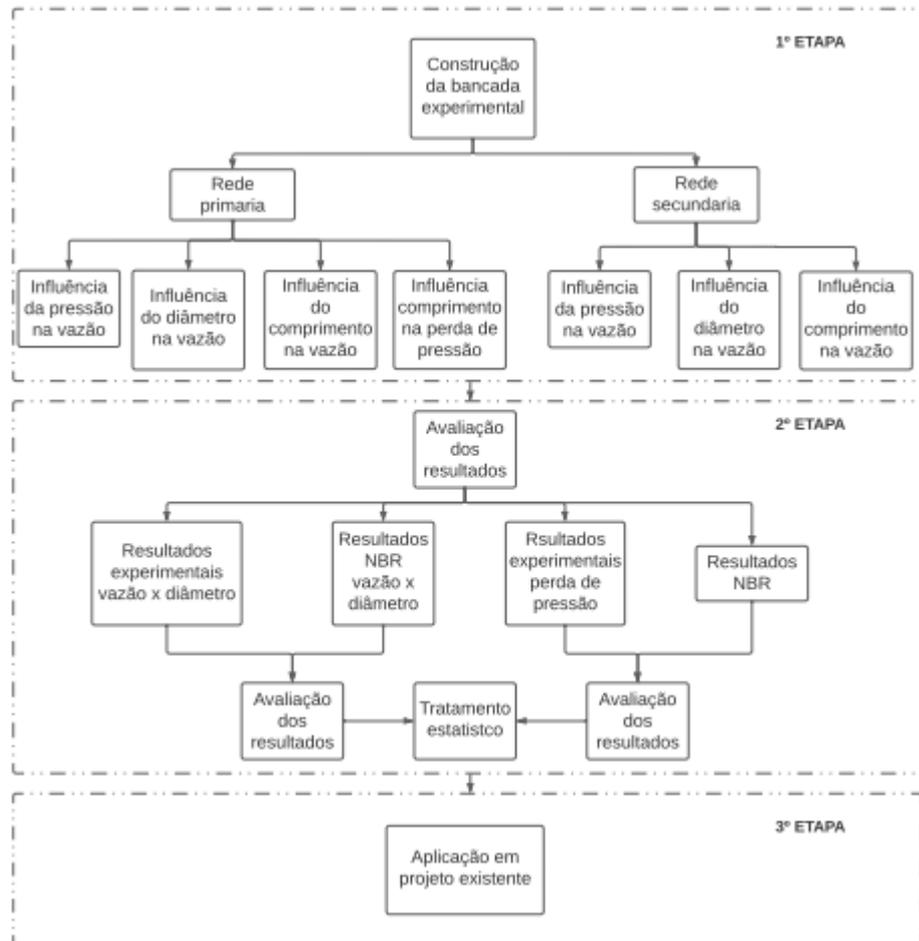
$$PA^2 - PB^2 = \left( 4,67 \cdot 10^5 \cdot S \cdot L \cdot \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}} \right) \quad (12)$$

$$PA - PB = \left( 2273 \cdot S \cdot L \cdot \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}} \right) \quad (13)$$

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi desenvolvido conforme apresenta o fluxograma da Fig. 2.

Figura 2: Fluxograma do procedimento experimental.

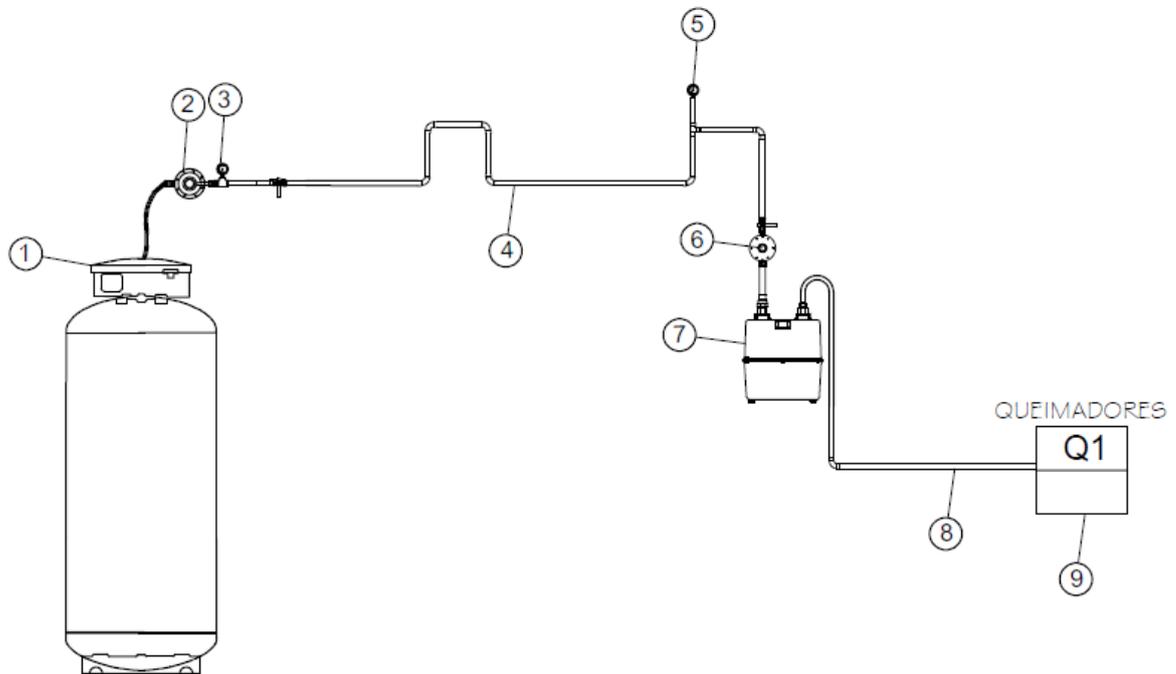


Fonte: Do Autor (2023)

### 3.1 CONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

O procedimento experimental iniciou-se a partir da construção de uma bancada didática com o intuito de simular a real instalação de gás de um edifício residencial, com todos os equipamentos e tubulações que estes projetos contemplam, conforme apresenta a Fig. 3.

Figura 3: Projeto da bancada experimental.



Fonte: Do Autor (2023).

Onde:

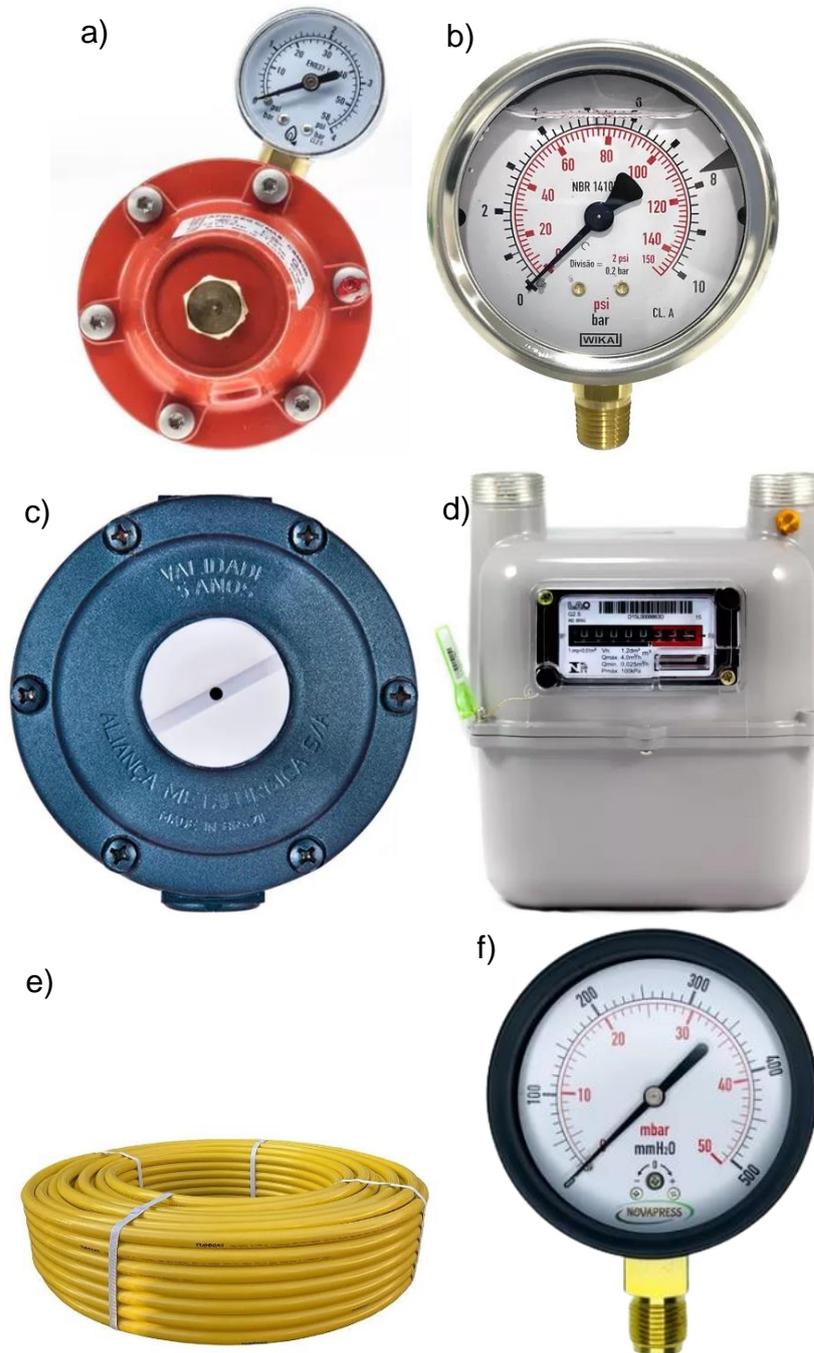
- 1 - Botijão de gás;
- 2 – Regulador de primeiro estágio;
- 3 – Manômetro;
- 4 – Rede Geral;
- 5 – Manômetro;
- 6 – Regulador de segundo estágio;
- 7 – Medidor de vazão de gás;
- 8 – Rede secundária;
- 9 – Representação conjunto de queimadores de gás.

### 3.1.1 Instrumentação da Bancada Experimental

A Fig. 4 apresenta o regulador de primeiro estágio na Fig. 4-a; o manômetro com escala 0-10 bar na Fig. 4-b; o regulador de segundo estágio na Fig. 4-c; o medidor de vazão de gás na Fig. 4-d; o tipo de tubulação utilizada para variar

o comprimento das redes primárias e secundárias durante o estudo, na Fig. 4-e; e o manômetro para redes secundárias, na Fig. 4-f.

Figura 4: Equipamentos da bancada



Fonte: Do Autor (2023)

### 3.1.2 Rede Primária

Em todo o procedimento experimental não foi utilizado o regulador de segundo estágio para as redes primárias, representado pelo n. 6 na Fig. 3.



### 3.1.2.1 Influência da Pressão na Vazão

O regulador de primeiro estágio é o responsável por ajustar a pressão na rede primária (representado pelo n. 2 na Fig. 3 e pela Fig. 4-a). Variou-se a pressão entre 90 kPa e 25 kPa, observou-se os resultados da diferença de vazão obtidos através do medidor de gás volumétrico (representado pelo n. 7 na Fig. 3 e pela Fig. 4-d).

### 3.1.2.2 Influência do Diâmetro na Vazão

Variou-se o diâmetro da tubulação da rede primária (representado pelo n. 4 na Fig. 3) em 4,77 mm, 7,94 mm e 12 mm, com o intuito de observar qual a sua influência na vazão.

Para a variação dos diâmetros foi desconectada a tubulação entre os manômetros (representados pelos n. 3 e 5 na Fig. 3) e, nesse trecho, foram realizadas conexões com tubulação multicamada (Fig.4-e), com diferentes comprimentos e diâmetros.

### 3.1.2.3 Influência do Comprimento na Vazão

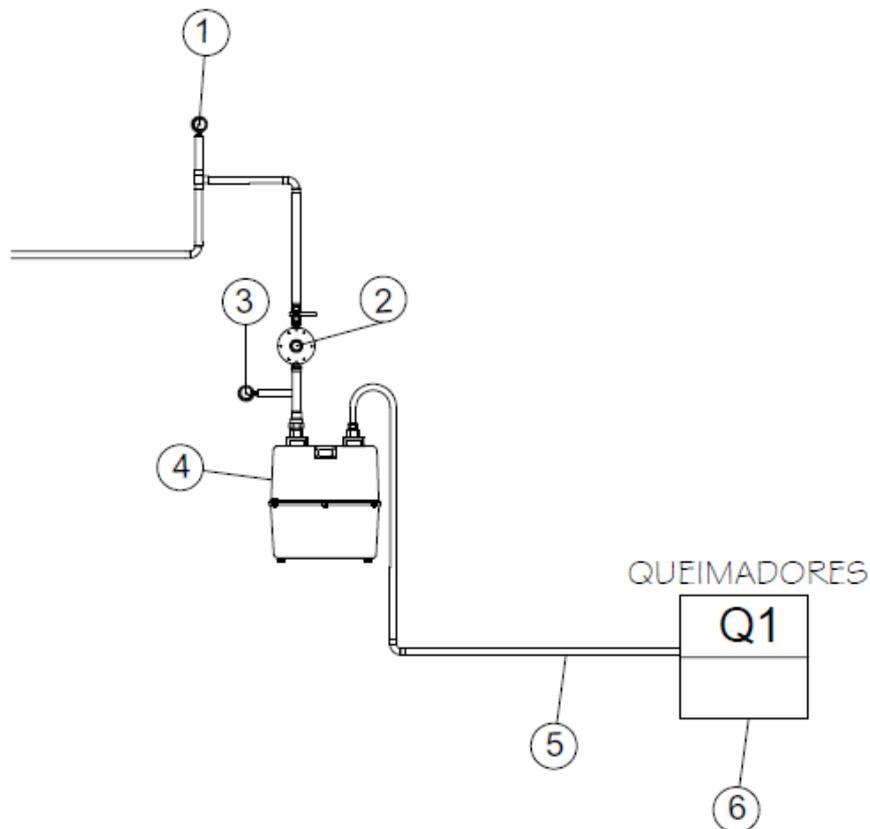
Entende-se que, conforme apresenta a Eq. de *Bernoulli* o comprimento tem influência direta na pressão, afetando assim a vazão final. Com o intuito de verificar de maneira experimental esse fenômeno, variou-se o comprimento da rede geral (representado pelo n. 4 na Fig. 3), da mesma maneira que no procedimento anterior, entre 7 m, 13 m, 20 m, 100 m e 120 m, e observou-se o comportamento através dos manômetros (representado pelos números 3 e 5 na Fig. 3, e pela Fig. 4-b).

Para todos os testes da rede primária não foi utilizado o regulador de segundo estágio. Foi utilizada uma pressão abaixo de 100 kPa, que é a pressão máxima para o medidor de gás volumétrico.

## 3.1.3 Rede Secundária

A Fig. 5 apresenta o trecho da bancada experimental utilizado para redes secundárias.

Figura 5: Bancada experimental para redes secundárias.



Fonte: Do Autor (2023)

A Fig. 6 apresenta as seguintes informações:

- 1 - Manômetro;
- 2 – Regulador de segundo estágio;
- 3 – Manômetro;
- 4 – Medidor de gás;
- 5 – Tubulação da rede secundária;
- 6 – Representação do conjunto de queimadores de gás.

### 3.1.3.1 Influência da Pressão na Vazão

O regulador de segundo estágio é o responsável por ajustar a pressão na rede primária (representado pelo n. 2 na Fig. 5 e pela Fig. 4-c). Variando a pressão entre 4,8 kPa, 2,0 kPa e 0,9 kPa, foi possível observar a diferença de vazão obtida através do medidor de gás volumétrico (representado pelo n. 7 na Fig. 3 e pela Fig. 4-d).

### 3.1.3.2 Influência do Comprimento na Vazão

Para essa parte do experimento foi utilizada somente a segunda parte da bancada (Fig. 5), variou-se o item n. 4 em 0,5 m, 20 m, 100 m, 120 m, utilizando a tubulação de multicamadas (Fig. 4-e), a fim de observar o comportamento da vazão.

A Fig. 6 ilustra a bancada experimental utilizada no presente estudo.

Figura 6: Bancada experimental em funcionamento.



Fonte: Do Autor (2023)

### 3.1.3.3 Influência do diâmetro na Vazão

Variou-se o diâmetro da tubulação da rede secundária (representado pelo n. 4 na Fig. 5) em 4,77 mm, 7,94 mm e 12 mm, com o intuito de observar a variação na vazão.

Para a variação dos diâmetros foi desconectada a tubulação entre o medidor e os queimadores (representados pelos n. 3 e 6 na Fig. 5) e, nesse trecho, foram realizadas conexões com tubulação multicamada (Fig 4-e), com diferentes comprimentos e diâmetros.

### 3.1.4 Regressão Linear

A técnica estatística mais utilizada para pesquisar e modelar o relacionamento existente entre as diversas variáveis de um processo é a análise de



regressão, que pode ser utilizada com vários objetivos como, por exemplo, descrição, predição, controle e estimação (DIAS, 2005). Para análise estatística do presente trabalho foi utilizada a regressão linear múltipla.

Na regressão linear é possível estabelecer algum tipo de relação entre as variáveis independentes e a variável dependente. No caso das séries com tendência linear e sazonalidade, os dados são ajustados a um modelo através de regressão linear. Para modelos apenas com tendência, é aplicada a regressão linear simples, pois existe somente uma variável independente, porém, quando é incorporada a componente de sazonalidade no modelo, é utilizada a regressão linear múltipla (FARIA, 2011).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesta seção são apresentados os resultados e as discussões acerca das influências de alterações dimensionais e de parâmetros de operação da bancada experimental em comparação com os valores da norma brasileira, e com equações encontradas na literatura, as quais foram descritas no item 2.2 do presente trabalho.

### **4.1 REDES PRIMÁRIAS**

#### **4.1.1 Influência do diâmetro, pressão e comprimento na vazão**

Inicialmente, para o estudo, foi sugerido apenas o uso das pressões de 90 e 25 kPa, porém quando a tubulação tinha o seu diâmetro reduzido, a pressão de entrada caía, conforme apresenta a Tab. 1.

Na Tab. 1 são apresentados os resultados de vazão encontrados com as variáveis determinadas, diâmetro, pressão e comprimento da tubulação. Nas duas últimas colunas se encontram os resultados sugeridos pela NBR 15.526 (2016) e pela equação de *Weymouth*, para a variável diâmetro.

De acordo com a Tab. 1, é possível observar que, para os dados com pressão de entrada de 90 kPa e diâmetro de 12 mm, o diâmetro recomendado pela norma, para suprir a vazão, é menor do que o utilizado. Esse fato pode ter sido decorrente da capacidade limitada dos aparelhos para a queima de gás. Portanto,

por se caracterizar como uma limitação do estudo, para a construção do gráfico esses dados foram desconsiderados.

Para os diâmetros calculados pela equação de *Weymouth*, é possível observar que há dois valores de diâmetros que são semelhantes aos diâmetros da bancada. Como foi utilizado um manômetro analógico, com escala de 1-10, era mais fácil visualizar a diferença de pressão nos trechos em que possuíam uma pressão mais elevada e, para esses casos em que foram encontrados os mesmos valores de diâmetros, provavelmente indicam que chegamos ao limite de vazão do sistema para aqueles diâmetros.

Ademais, os diâmetros encontrados pela equação de *Weymouth* foram menores do que os diâmetros de bancada, e menores do que os diâmetros recomendados pela NBR 15.526.

Tabela 1: Variação parâmetros das redes primárias.

PA (kPa)	PB (kPa)	Comprimento (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Diâmetro bancada (mm)	Diâmetro conforme NBR 15.526/2016 (mm)	Diâmetro Weymouth (mm)
75	12,5	7	2,181	4,77	5,71	4,77
90	81,25	13	2,613	7,94	9,10	7,94
90	77,5	20	2,613	12	9,28	8,04
90	53	100	2,478	12	10,48	8,75
90	50	120	2,43	12	10,68	8,87
12,5	2,5	7	1,545	4,77	10,58	6,54
13,75	12	13	1,986	7,94	16,97	11,69
18,75	10	20	2,076	12	13,21	9,00
25	2,5	100	1,908	12	14,82	9,78
25	2,2	120	1,848	12	15,20	9,98

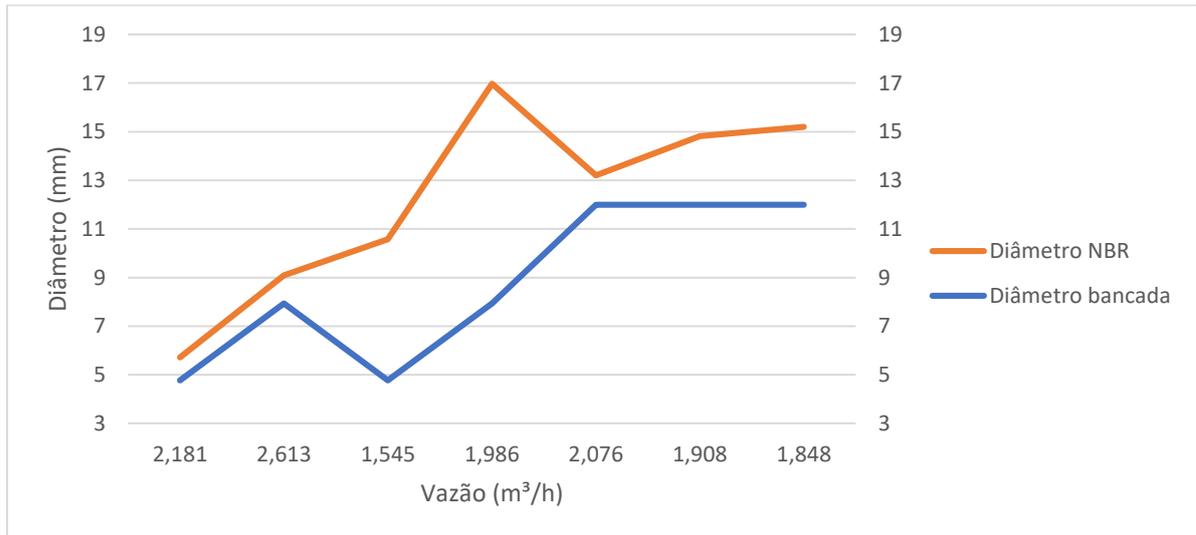
Fonte: Do Autor (2023)

Conforme apresenta a Tab. 1, com o aumento da pressão e do diâmetro, ocorreu o aumento da vazão. Já, quando aumentado o comprimento da tubulação de 20 para 120 m para a tubulação de 12 mm, ocorreu a redução da vazão de, no máximo, 10,98 %. As maiores variações nos valores de vazão se deram com a variação do comprimento de 7 para 20 m, com aumento de até 34,37 %, porém aqui também ocorreu a variação de diâmetro.

A Fig. 7 apresenta o gráfico de comparação dos diâmetros utilizados na bancada experimental versus os diâmetros calculados pelo método normatizado.

Podemos observar, na Fig. 7 que, para as vazões obtidas, os diâmetros propostos pela NBR sempre apresentaram maiores bitolas quando comparadas com as bitolas obtidas na bancada em estudo.

Figura 7: Comparação bancada *versus* NBR para redes primárias



Fonte: Do Autor (2023)

Da mesma forma, conforme já concluído por Lohn e Bittencourt (2021), é possível observar que, quanto menores as pressões de operações utilizadas, maiores os diâmetros necessários para atender aos itens normativos.

#### 4.1.2 Método de Regressão Linear

O coeficiente de ajuste ( $R^2$ ) deve ser interpretado como a proporção de variação total da variável dependente que é explicada pela variação das variáveis independentes. Ou seja, de acordo com a Tab. 2, para um  $R^2 = 0,8604$ , significa que para 86,04 % dos casos, o diâmetro da tubulação das redes primárias pode ser definido pela pressão manométrica após o regulador de primeiro estágio, comprimento linear de tubulação e vazão volumétrica total dos aparelhos de queima.

Tabela 2: Regressão linear múltipla para redes primárias

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,927605
R-Quadrado	0,860451
R-quadrado ajustado	0,790676
Erro padrão	1,418616
Observações	10

Fonte: Do Autor (2023)

Para o teste de variância ANOVA para a regressão (Tab. 3), nota-se que o valor de Fischer (F) é maior que o F de significância, sendo este último menor que 0,05. Sendo assim, de acordo com o teste, é possível afirmar que existe diferença nos valores de diâmetro da tubulação em razão da pressão após o regulador de segundo estágio, comprimento linear de tubulação e vazão volumétrica.

Tabela 3: ANOVA para redes primárias

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	74,45253	24,81751	12,33185996	0,005624385
Resíduo	6	12,07483	2,012471		
Total	9	86,52736			

SQ = soma dos quadrados.

gl = são os graus de liberdade;

MQ = são as médias quadráticas;

F = é o teste de Fischer;

p = teste de confiabilidade;

R<sup>2</sup> = o ajuste ao modelo.

Fonte: Do Autor (2023)

De acordo com a Tab. 4, é possível afirmar que, para um nível de confiabilidade de 95%, todas as variáveis independentes, bem como a constante da equação são estatisticamente significantes no modelo estudado, pois todas apresentaram valor-p menor que 0,05 (5 %) (FERNANDES, 2015).

Tabela 4: Parâmetros estatísticos para redes primárias

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-3,05178	2,699381	-1,13055	0,301402315
PA	-0,11652	0,032676	-3,5658	0,011843972
Comprimento tubulação (m)	0,050561	0,009668	5,22976	0,001957641
Vazão <sup>1,83</sup> (m <sup>3</sup> /h)	3,892638	0,955387	4,074409	0,006543197

Fonte: Do Autor (2023)

### 4.1.3 Equação ajustada para redes primárias

Mesmo com a quantidade de equações existentes para o dimensionamento de tubulações de gás, na maioria dos casos essas equações não representam com precisão o comportamento do gás nos gasodutos (MORAIS; LIMA, 2005). Portanto, foram geradas duas equações de ajuste com os dados coletados no presente estudo: uma para as redes primárias e uma para as redes secundárias.

A Eq. 14 apresenta a equação de ajuste para redes primárias, na qual se observa que o diâmetro é dependente da pressão, comprimento da tubulação e vazão.

$$D = -0,116.PA + 0,05.L + 3,892.Q^{1,83} \quad (14)$$

Se compararmos a equação de ajuste (Eq. 14) com a equação de *Darcy-Weisbach* (Eq. 6), podemos observar que as variáveis pressão, comprimento e vazão possuem relação semelhante. Ou seja, a vazão da equação ajustada é quase quadrática e o restante das variáveis, linear. Da mesma forma, as variáveis vazão e comprimento da tubulação, são diretamente proporcionais ao diâmetro da tubulação, e todas as variáveis na equação de ajuste possuem influência no diâmetro, assim como na equação de *Darcy-Weisbach*.

## 4.2 REDES SECUNDÁRIAS

### 4.2.1 Influência do diâmetro, pressão e comprimento na vazão

Na Tab. 5 são apresentados os resultados de vazão encontrados com as variáveis determinadas, diâmetro, pressão e comprimento da tubulação. Na última coluna se encontram os resultados sugeridos pela NBR 15.526 para a variável diâmetro.

Na Tab. 5 foram observados 3 dados em que o diâmetro recomendado pela norma é menor do que o diâmetro utilizado (comprimento de tubulação de 0,5 m para as pressões de 2,0 e 4,8 kPa, e comprimento de tubulação de 7 m para a pressão de 4,8 kPa). Da mesma, forma que para as redes primárias, isso pode ter

ocorrido pela capacidade limitada dos aparelhos para a queima de gás, portanto, foram desconsiderados esses dados para a construção do gráfico.

Tabela 5: Variação parâmetros redes secundárias.

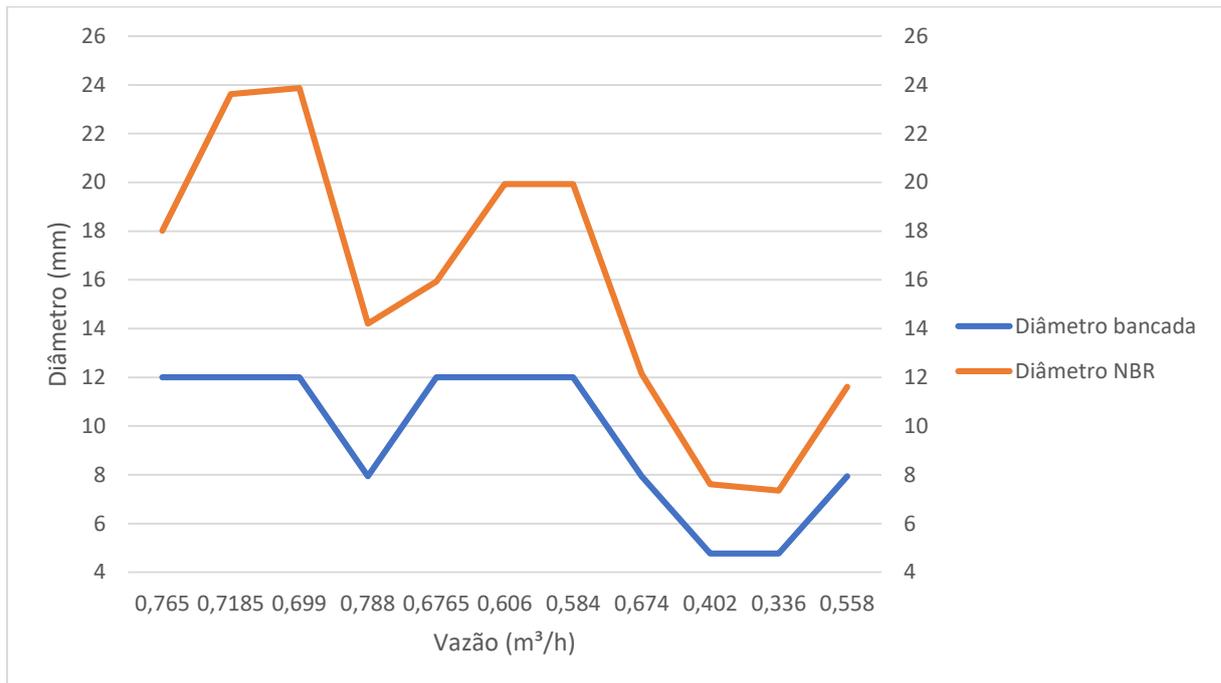
Diâmetro bancada (mm)	PA (kPa)	PB (kPa)	Comprimento (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Diâmetro conforme NBR 15.526/2016 (mm)
12	4,8	4,78	0,5	0,801	8,78
12	4,8	4,78	20	0,765	18,02
12	4,8	4,78	100	0,7185	23,63
12	4,8	4,78	120	0,699	23,87
7,94	4,8	4,78	5,5	0,788	14,20
4,77	4,8	4,78	7	0,468	3,18
12	2,0	1,98	0,5	0,6885	7,54
12	2,0	1,98	20	0,6765	15,93
12	2,0	1,98	100	0,606	19,93
12	2,0	1,98	120	0,584	19,93
7,94	2,0	1,98	5,5	0,674	12,14
4,77	2,0	1,98	7	0,402	7,61
4,77	0,98	0,97	7	0,336	7,35
7,94	0,98	0,97	5,5	0,558	11,61

Fonte: Do Autor (2023)

Assim, como para as redes primárias, com o aumento da pressão e do diâmetro, também ocorreu o aumento da vazão. Da mesma forma que para as redes primárias, quando aumentado o comprimento da rede de 0,5 para 120 m, na tubulação de 12 mm, houve redução da vazão em até 15,18 %. As maiores variações nos valores de vazão se deram com a variação do comprimento de 0,5 para 7 m, com uma redução de até 51,20 %, porém aqui também ocorreu a variação do diâmetro.

A Fig. 8 apresenta o gráfico de comparação dos diâmetros utilizados na bancada experimental versus os diâmetros calculados pelo método normatizado. Podemos observar que, para as vazões obtidas, os diâmetros propostos pela NBR 15.526 (2016) sempre apresentaram maiores bitolas quando comparadas com as bitolas obtidas na bancada em estudo.

Figura 8: Comparação bancada x NBR para redes secundárias



Fonte: Do Autor (2023).

Na Tab. 6 são apresentados os resultados de diâmetros comparados com a NBR 15.526 (2016) e com a equação de *Weymouth*.

Conforme já comentado, devido à utilização do manômetro analógico, era mais fácil a visualização da diferença de pressão nos trechos em que possuíam uma pressão mais elevada e, portanto, para as redes secundárias houve a limitação das baixas pressões utilizadas, sendo relevante sugerir a medição da pressão com manômetros digitais.

Para ser válida a utilização da equação de *Weymouth*, houve alteração das pressões para as redes secundárias. Ademais, os diâmetros encontrados pela equação de *Weymouth* foram maiores do que os diâmetros de bancada (com exceção dos pontos com comprimento da tubulação de 0,5 m), e maiores do que os diâmetros recomendados pela NBR 15.526.

Tabela 6: Comparação parâmetros redes secundárias.

PA (kPa)	PB (kPa)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Diâmetro bancada (mm)	Diâmetro conforme NBR (mm)	Diâmetro <i>Weymouth</i> (mm)
4,8	4,3	0,801	12	4,50	9,40
4,8	4,2	0,765	12	8,90	13,82
4,8	4,1	0,7185	12	11,30	16,38
4,8	4,1	0,699	12	11,42	16,78
4,8	4,3	0,788	7,94	7,28	14,67
4,8	4,3	0,468	4,77	4,55	12,62
2,0	1,5	0,6885	12	3,87	8,66
2,0	1,4	0,6765	12	7,87	13,19
2,0	1,3	0,606	12	9,53	15,41
2,0	1,3	0,5835	12	9,53	15,72
2,0	1,5	0,674	7,94	6,23	13,49
2,0	1,5	0,402	4,77	3,90	11,62
0,98	0,45	0,336	4,77	3,22	10,78
0,98	0,45	0,558	7,94	5,09	12,47

Fonte: Do Autor (2023)

#### 4.2.2 Método de Regressão Linear

De acordo com a Tab. 7, para um  $R^2=0,8301$ , significa que em 83,01 % dos casos, o diâmetro da tubulação das redes secundárias pode ser definido pela pressão manométrica após o regulador de segundo estágio, comprimento linear de tubulação e vazão volumétrica total dos aparelhos de queima.

Tabela 7: Regressão linear múltipla para redes secundárias

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,911109384
R-Quadrado	0,83012031
R-quadrado ajustado	0,779156404
Erro padrão	1,453301476
Observações	14

Fonte: Do Autor (2023)

Da mesma forma que para as redes primárias, nota-se que o valor de Fischer (F) é maior que o F de significância, sendo este último menor que 0,05. Sendo assim comprova-se que existem diferenças nos valores de diâmetro da tubulação em razão da pressão após o regulador de segundo estágio, comprimento linear de tubulação e vazão volumétrica (Tab. 8).

Tabela 8: ANOVA para redes secundárias

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	103,2074411	34,40248036	16,28839627	0,000354824
Resíduo	10	21,12085179	2,112085179		
Total	13	124,3282929			

*SQ* = soma dos quadrados;  
*gl* = são os graus de liberdade;  
*MQ* = são as médias quadráticas;  
*F* = é o teste de Fischer;  
*p* = teste de confiabilidade;  
*R*<sup>2</sup> = o ajuste ao modelo.

Fonte: Do Autor (2023)

De acordo com a Tab. 9, considerando-se um nível de confiabilidade de 95 %, as variáveis vazão e comprimento, bem como a constante da equação são estatisticamente significantes no modelo estudado, pois todas possuem valor-p menor que ~0,05 (5%) (FERNANDES, 2015). Já a variável pressão apresentou nível de significância de, aproximadamente, 5,97 %.

Tabela 9: Parâmetros estatísticos para redes secundárias

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-2,093240221	1,903102889	-1,099909118	0,297144559
PA <sup>1,83</sup> (kPa)	-0,134511933	0,063353034	-2,123212183	0,059699866
Comprimento (m)	0,029696376	0,008384486	3,541824453	0,005340492
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	18,87367658	3,381029334	5,582227988	0,000233382

Fonte: Do Autor (2023)

#### 4.2.3 Equação ajustada para redes secundárias

A Eq. 15 apresenta a equação de ajuste para redes secundárias, na qual se observa que o diâmetro é dependente da pressão, comprimento da tubulação e vazão.

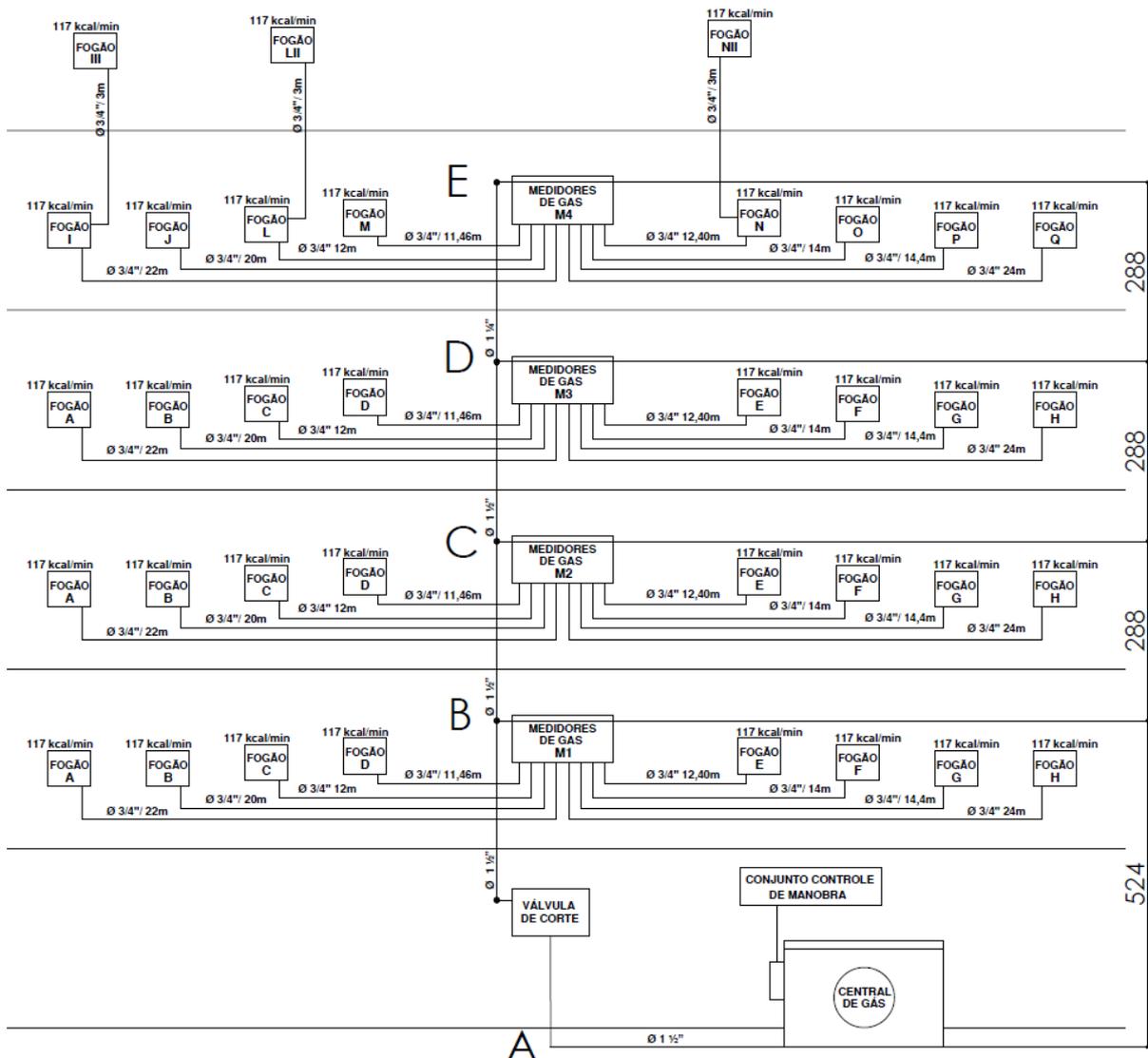
$$D = -2,093 - 0,134 \cdot PA^{1,83} + 0,029 \cdot L + 18,873 \cdot Q \quad (15)$$

Aqui, da mesma forma que para a equação de ajuste para redes primárias, as variáveis vazão e comprimento da tubulação, são diretamente proporcionais ao diâmetro da tubulação, assim como na equação de *Darcy-Weisbach*. Porém, a variável pressão se apresentou de forma quase quadrática, e o restante das variáveis de forma linear.

### 4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM PROJETO EXISTENTE

A Fig. 9 apresenta um projeto real de um edifício residencial. Neste projeto estão contempladas as bitolas das redes primárias e secundárias e são especificados os diâmetros que foram recalculados, conforme as Tab. 9 e 10.

Figura 9: Projeto real com variáveis ajustadas.



Fonte: Do Autor (2023).

A Tab. 10 apresenta os cálculos baseados na equação ajustadas (Eq. 14) para redes primárias. Como se pode observar houve redução dos diâmetros calculados, quando comparados com os diâmetros utilizados no projeto existente (Fig. 9).

Nos trechos C-D e D-E houve redução, em comparação com o projeto existente, de até 60 % do tamanho do diâmetro da tubulação, o que equivale à redução de 3 numerações de diâmetro comercial.

Tabela 10: Parâmetros ajustados para redes primárias.

Trecho	Potência computada (kcal/h)	F.S %	Potência adotada (kcal/h)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	L (m)	Pa (kPa)	$\Delta P$	Pb (kPa)	Diâmetro (mm)	Diâmetro comercial
A-B	245700	43,515	106916,62	4,455	15,24	150	0,0553	149,945	40,23	1.1/2"
B-C	189540	49,740	94277,606	3,928	2,88	149,9447	0,0304	149,914	27,30	1.1/2"
C-D	133380	58,481	78001,602	3,250	2,88	149,9144	0,0304	149,884	13,35	3/4"
D-E	56160	79,476	44633,479	1,860	2,88	149,884	0,0304	149,854	8,18	1/2"

Fonte: Do Autor (2023)

A Tab. 11 apresenta os cálculos baseados na equação ajustada (Eq. 15) para redes secundárias. Da mesma forma que para as redes primárias, houve redução dos diâmetros calculados, quando comparados com os diâmetros utilizados no projeto existente (Fig. 9). Para as redes secundárias, a redução do diâmetro comparado com o projeto existente foi de 16,01 %.

Tabela 11: Parâmetros ajustados para redes secundárias.

Apartamento	Potência computada (kcal/h)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	L (m)	Pa (kPa)	$\Delta P$	Pb (kPa)	Diâmetro (mm)	Diâmetro comercial (mm)
A	7020	0,293	22	2	0,0053	1,995	3,59	16
B-J	7020	0,293	20	2	0,0053	1,995	3,53	16
C	7020	0,293	12	2	0,0053	1,995	3,30	16
D-M	7020	0,293	11,46	2	0,0053	1,995	3,29	16
E	7020	0,293	12,4	2	0,0053	1,995	3,31	16
F- O	7020	0,293	14	2	0,0053	1,995	3,36	16
G-P	7020	0,293	14,4	2	0,0053	1,995	3,37	16
H-Q	7020	0,293	24	2	0,0053	1,995	3,65	16
I	14040	0,585	25	2	0,0316	1,9684	9,21	16
L	14040	0,585	15	2	0,0316	1,9684	8,92	16
N	14040	0,585	15,4	2	0,0316	1,9684	8,93	16

Fonte: Do Autor (2023)

## 5 CONCLUSÕES

Através dos métodos experimentais, conclui-se que em 86,04 % dos casos o diâmetro pode ser definido pela pressão manométrica, comprimento linear de tubulação e vazão volumétrica, para as redes primárias, e em 83,01 % para as redes secundárias. A pressão e o diâmetro se mostraram diretamente proporcionais à vazão, ou seja, quanto maior a pressão e o diâmetro, maior a vazão observada. Já o comprimento da tubulação se mostrou inversamente proporcional à vazão (quando comparada com a mesma bitola de tubulação), pois, quando ocorreu o aumento do comprimento das tubulações, houve a redução da vazão para as redes primárias, em até 10,98 %, e secundárias em até 15,18 %.

Durante os testes também foi observado que, quando o diâmetro da tubulação era reduzido, ocorreu uma grande variação na pressão, podendo-se concluir que houve um subdimensionamento para aquela vazão aplicada. Também, quando não foi atingido o limite de vazão para um teste eficiente, concluiu-se que seriam necessários mais aparelhos de queima para testar ao limite a vazão, da mesma forma, para quando o diâmetro utilizado foi menor do que o diâmetro recomendado pela norma. Outra limitação foi a utilização de manômetro analógico, com escala de 1-10, para medição da pressão, o que dificultou a leitura da pressão em trechos com pressão reduzida, sendo sugerida a utilização de manômetros digitais.

Os diâmetros encontrados por meio das equações ajustadas do presente trabalho foram menores do que os diâmetros recomendados pela NBR 15.526 (ressalvadas as limitações já comentadas). Os diâmetros obtidos por meio da equação de *Weymouth*, também foram menores do que os diâmetros da bancada, mas somente para as redes primárias, pois, para as redes secundárias concluiu-se que a equação de *Weymouth* não se aplicou devido às baixas pressões.

Ao aplicar as equações de regressão linear ajustadas em um projeto existente, observou-se a redução na maioria dos diâmetros das tubulações, sendo de até 60 % (redução de 3 numerações de diâmetro comercial) para as redes primárias, e de 16,01 % para as redes secundárias. Essa redução gera impacto nos custos do projeto, já que o investimento na construção de uma rede de distribuição de gás está diretamente atrelado aos diâmetros dos tubos utilizados.



Estudos experimentais e *softwares* para cálculo de redes de distribuição de gás são escassos. Um projeto econômico, que evite gastos por superdimensionamento, mas que também seja seguro, evidencia a importância de conhecimento empírico nessa área, porém, para o presente estudo ainda seria necessário que fossem realizados mais experimentos em torno das variáveis aqui observadas.

## REFERÊNCIAS

- AGWU, Ogbonnaya E.; MARKSON, I. E.; UMANA, M. O. Minimizing Energy Consumption in Compressor Stations along Two Gas Pipelines in Nigeria. **American Journal of Mechanical Engineering and Automation**, 3(4), p. 29-34, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15526**: redes de distribuição interna para gases combustíveis em instalações residenciais: projeto e execução. Rio de Janeiro. 2007.
- BENGTSON, Harlan. **Natural Gas Pipeline Flow Calculations**. PDH Star, 2019.
- CORPO DE BOMBEIROS MILITAR. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 008/DAT/CBMSC (IN nº 8)**: Instalação de Gás Combustível (GLP e GN). Santa Catarina, 2018.
- DIAS, Alícia Bonfoni. **Estimação dos Parâmetros do Modelo de Regressão Linear Simples pelo Método Não-Paramétrico**. Monografia (Especialista em Estatística, e Modelagem Quantitativa) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- FARIA, Bruno Fernando Pinheiro. **Teste F na Regressão Linear Múltipla para Dados Temporais com Correlação Serial**. Dissertação (Mestrado em Estatística, Matemática e Computação, especialidade Estatística Computacional) – Universidade Aberta, Lisboa, 2011.
- FERNANDES, Ana Marta Lisboa Vila. **O valor-p do teste dos sinais**. 2015. 89 f. Tese (Doutorado) - Curso de Matemática e Aplicações, Técnico Lisboa, Lisboa, 2015.
- FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO (FDE). **Manual de uso e segurança de instalações de gás em escolas** / Fundação para o Desenvolvimento da Educação. - 2. ed. São Paulo : FDE/DOS, 2009. 36 p.
- LOHN, Diorges Filipe; BITTENCOURT, Luciano Manoel. **Projeto de instalações prediais de Gás Liquefeito do Petróleo (GLP) e Gás Natural (GN)**: um estudo comparativo entre as infraestruturas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina - Palhoça/SC.



LOPEZ, Thiago Fernando Magrini. **Dimensionamento de rede de tubulações para transporte de biogás**. Monografia (Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva de Biogás) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

MINATTO JUNIOR, Edio; DELLA, Juliano Possamai. **Análise comparativa do dimensionamento e custos da rede interna predial de Gás Natural e Gás Liquefeito de Petróleo**. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense - Criciúma/SC.

MORAIS, Mabel Scianni; LIMA, José Wanderley Marangon. Tarifação de redes de gás e energia elétrica: influência na tomada de decisão dos agentes. **Revista Brasileira de Energia**, v. 11, n. 2, 2005.

RIO DE JANEIRO. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua Anual - PNADC/A**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6739>. Acesso em: 26 set. 2022.

SÃO PAULO (Município). **Decreto nº 24.714, de 07 de outubro de 1987**. Regulamenta o sistema de fiscalização, disposições gerais para utilização de gás combustível nos edifícios e construções em geral, e dá outras providências.

SINDICATO NACIONAL DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO - SINDIGAS (Rio de Janeiro). **Panorama do Setor: glp em movimento**. GLP em Movimento. 2021. Disponível em: [https://www.sindigas.org.br/Download/PANORAMAS/NOVO%20GLP%20EM%20MOVIMENTO\\_NOVEMBRO\\_2021\\_Rev4.pdf](https://www.sindigas.org.br/Download/PANORAMAS/NOVO%20GLP%20EM%20MOVIMENTO_NOVEMBRO_2021_Rev4.pdf). Acesso em: 29 set. 2022.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me capacitar a enfrentar todos os obstáculos e adversidades da vida, inclusive a minha graduação.

Ao meu pai Laerte, que por estar ao meu lado durante todo o período da graduação, me motivando, auxiliando e não medindo esforços para me cobrir quando necessário, nas atividades da empresa.

Agradeço a toda a minha família, minha mãe Soraia, minhas irmãs Morgana, Sabrina e Larissa, pela dedicação e cuidado com a minha vida.

Agradeço a minha noiva Giovanna, que durante esse período final, sem dúvidas, me sustentou em orações, me motivou e me ensinou a ver o quão capaz eu sou.

Agradeço ao meu orientador Guilherme que sempre se mostrou solícito quando necessário, me auxiliando em todos os momentos na construção desse trabalho. Também um agradecimento a minha amiga Angélica por todo apoio e orientação na construção desse trabalho.

### LISTA DE SÍMBOLOS

F	[%]	Fator de simultaneidade
C	[Kcal/h]	Potência computada
A	[Kcal/h]	Potência adotada
Q	[m <sup>3</sup> /h]	Vazão do gás
Q*	[pés <sup>3</sup> /dia]	Vazão do gás
		Poder calorífico inferior
PCI	[Kcal/m <sup>3</sup> ]	PCI GLP: 11.730 PCI GN: 9.400
ΔP	[kPa]	Perda de pressão
H	[m]	Altura do trecho vertical
		Densidade relativa do gás
G=S	[---]	GLP: 1,8 GN: 0,6
D	[mm]	Diâmetro interno do tubo
L	[m]	Comprimento total
L'	[milhas]	Comprimento equivalente da tubulação
PA	[kPa]	Pressão de entrada
PB	[kPa]	Pressão de saída
h <sub>f</sub>	m	Perda de carga por atrito
f	[---]	Fator de atrito
g	m/s <sup>2</sup>	Aceleração da gravidade
V	m/s	Velocidade do fluxo
A*	m <sup>2</sup>	Área da seção transversal da tubulação
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Densidade do gás
T	°C	Temperatura do gás no trecho
T <sub>n</sub>	0 °C	Temperatura na CNTP



$P_n$	101,325 kPa	Pressão na CNTP
$z$	[---]	Fator de compressibilidade do gás
$T_b$	°R	Temperatura em condição padrão (520 °R)
$P_b$	psia	Pressão atmosférica (14,7 psia)
$P_1$	psia	Pressão no início do trecho
$P_2$	psia	Pressão no fim do trecho
$T_f$	°R	Temperatura média do gás GLP (500 °R)
$D^*$	pol	Diâmetro
$e$	[---]	Eficiência do tubo (0,92)
$\Delta H$	pés	1
$L_e$	milhas	Comprimento efetivo do gasoduto em milhas, levando em consideração a diferença de elevação entre a entrada e a saída