

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA E ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA
INJEÇÃO DE BIOMETANO EM REDE DE GÁS NATURAL

por

Marco Antonio Nesello Grabski

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2015

CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA E ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO
DA INJEÇÃO DE BIOMETANO EM REDE DE GÁS NATURAL

por

Marco Antonio Nesello Grabski

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Arthur Beck

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Horácio Antonio Vielmo

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 25, junho de 2015.

Dedicado à minha mãe, Fátima Nesello Grabski, e ao meu pai, Gabriel Grabski.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Arthur Beck, pelo apoio dado para realização deste trabalho e pelo crescimento acadêmico e humano que essa convivência me proporcionou. Expresso minha gratidão ao DEMEC/UFRGS e a todo corpo docente, em especial ao Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, por todo conhecimento que me foi transmitido ao longo do curso e do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à minha família, à minha namorada e aos amigos que, de formas diferentes, contribuíram para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado.

GRABSKI, M. A. N. **Caracterização da mistura e análise numérica do comportamento da injeção de biometano em rede de gás natural**. 2015. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo dos principais parâmetros de caracterização da mistura de gás natural e biometano para diferentes concentrações. Os parâmetros analisados são: poder calorífico, massa específica, densidade relativa e índice de Wobbe, sendo os cálculos efetuados de acordo com a norma da ABNT NBR 15213. Para todos os parâmetros, os resultados são menores para o biometano puro e crescem linearmente na medida em que a concentração molar de gás natural aumenta na mistura. Em um segundo momento faz-se uma simulação numérica para investigar o comportamento da injeção de biometano em rede de gás natural considerando três casos de velocidade de entrada de biometano. Conclui-se que a utilização da correlação de Colebrook-White combinada com o uso do fator de atrito proposto por Serre et al., 1994 é satisfatória para os casos 1 e 2, enquanto que para o caso 3 a sua utilização se mostrou inadequada. A distância necessária para homogeneização da mistura dos gases para o caso 3 foi de aproximadamente 2,12m. Para os casos 1 e 2 não ocorreu homogeneização dentro da distância simulada.

PALAVRAS-CHAVE: gás natural, biometano, injeção de biometano.

GRABSKI, M. A. N. **Mixture characterization and numerical analysis of biomethane injection behavior in the natural gas network**. 2015. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This work presents a study of the main characteristic parameters of natural gas and biomethane mixture for different concentrations. The analyzed parameters are: heating value, density, relative density and the Wobbe index. Calculations are made following the requirements of the ABNT NBR 15213 standard. The values of all parameters are lower for pure biomethane as compared to those of the natural gas, and they grow linearly as the natural gas molar concentration increases. In a second moment, numerical simulations are carried out to predicting the behavior of the biomethane injection in a natural gas piping considering three biomethane inlet velocity cases. The pressure drop and the distance required to achieving homogenization of the mixture are analyzed. The use of the Colebrook-White equation combined with the friction factor Eq. (2.3) proposed by Serre et al. 1994, is satisfactory for cases 1 and 2, whereas for case 3 their use proved invalid. The distance required for homogenization the gases mixture for case 3 was about 2.12 m. For cases 1 and 2, the homogenization has not occurred within the simulated distance.

KEYWORDS: natural gas, biomethane, biomethane injection.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos e proposição.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1	Processamento do biogás para obtenção de biometano e caracterização da mistura ...	1
2.2	Perda de carga em tubulações.....	2
3	CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA DE GÁS NATURAL E BIOMETANO.....	3
3.1	Composição dos gases.....	3
3.2	Poder calorífico.....	3
3.3	Massa específica e densidade relativa.....	4
3.4	Índice de Wobbe.....	4
3.5	Fator de compressibilidade.....	4
4	MODELO MATEMÁTICO.....	5
4.1	Equações de conservação.....	5
4.2	Modelo de turbulência.....	5
4.3	Transporte de espécies.....	5
5	MÉTODO NUMÉRICO.....	6
5.1	Método dos Volumes-Finitos.....	6
5.2	Caracterização geométrica.....	7
5.3	Condições de Contorno e Casos de Estudo.....	7
5.4	Domínio computacional e geração de malhas.....	8
5.5	Estimativa de erros e verificação dos resultados.....	8
5.6	Validação dos resultados.....	9
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	9
6.1	Poder calorífico.....	10
6.2	Densidade.....	10
6.3	Índice de Wobbe.....	11
6.4	Perda de carga.....	11
6.5	Homogeneização da mistura.....	12
7	CONCLUSÕES.....	13
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
	APENDICE A – ROTINA DE CÁLCULO PARA CARACTERIZAÇÃO NO SOFTWARE EES.....	16
	ANEXO A – EVOLUÇÃO DAS PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE BIOGÁS.....	19
	ANEXO B – VARIAÇÃO DO FATOR DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS.....	20

1 INTRODUÇÃO

O biogás é um recurso energético de origem renovável que desde 1950 é reconhecido em países como Índia e China como um combustível de enorme potencial [Abbasi et al., 2011]. O biogás pode ser produzido a partir de diferentes fontes como aterros, estações de tratamento de águas residuais (ETAR's) e digestão anaeróbica de resíduos agropecuários [Monteiro, 2011].

No Brasil, a purificação do biogás para obtenção de biometano já vem sendo implantada por diferentes empresas como Ecoenergia, Ecocitrus e Ecometano. No final de 2014 o biometano foi testado com sucesso em frotas de ônibus ("Scania e Itaipu testam ônibus a biometano", 2014), demonstrando o seu potencial de desenvolvimento no país. Recentemente, com a publicação da resolução ANP Nº8, 2015, foram estabelecidas as especificações do biometano para comercialização, sendo uma das alternativas de comercialização a injeção em rede de distribuição de gás natural.

A caracterização da mistura de biometano e gás natural é um fator de grande importância tanto para o agente que comercializa quanto para o que fará a utilização do combustível. A caracterização é feita a partir da definição do poder calorífico, da massa específica, da densidade relativa e do índice de Wobbe (definido como o quociente entre o poder calorífico superior e a raiz quadrada da densidade relativa). O índice de Wobbe foi criado com o objetivo de agrupar combustíveis gasosos com características de queima semelhantes entre si [Costa e Coelho, 2007].

Embora a purificação do biogás para obtenção do biometano seja um assunto bastante estudado, ainda não há um método internacionalmente reconhecido para a injeção de biometano em redes de gás natural e países como a Suécia, Suíça, Alemanha e França têm desenvolvido tecnologias próprias para essa finalidade [Petersson e Wellinger, 2009].

Relacionado ao tema, é relevante que se conheça o comportamento do escoamento no local da mistura dos gases. A perda de carga e o comprimento para homogeneização da mistura são parâmetros que dependem fortemente da velocidade de entrada do biometano, sendo portanto de suma importância que se conheçam os efeitos causados por diferentes velocidades de entrada desse gás.

1.1 Objetivos e proposição

O objetivo do trabalho é avaliar o comportamento da injeção de biometano em rede de distribuição de gás natural. Serão analisados o poder calorífico, a massa específica, a densidade relativa e o índice de Wobbe. Após definidos os parâmetros da mistura, será feita simulação numérica para prever o comportamento da injeção de biometano em rede de gás natural. Espera-se como resultados da simulação a estimativa da perda de carga e a distância necessária para homogeneização da mistura causada por diferentes velocidades de injeção de biometano.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A composição do biogás é basicamente uma relação de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e oxigênio podendo variar a concentração de metano de 45 a 75% de acordo com o método de purificação [Monteiro, 2011]. Para que o poder calorífico do biogás possa se aproximar do valor do poder calorífico do gás natural, torna-se claro a necessidade de purificação através de processos que aumentem a sua concentração de metano até um valor de aproximadamente 96%, passando esse a se chamar de biometano [Lombardi e Carnevale, 2013].

Existem diversos métodos comerciais para reduzir o dióxido de carbono contido no biogás, sendo esses métodos continuamente melhorados [Petersson e Wellinger, 2009]. A injeção do biometano (produto deste processo de melhoramento do biogás) em redes de gás natural é uma das formas de comercialização deste combustível [Lombardi e Carnevale, 2013].

2.1 Processamento do biogás para obtenção de biometano e caracterização da mistura

Os métodos mais comuns de redução do dióxido de carbono do biogás são o HPWS ("high pressure water scrubbing") [Browne et al., 2011; Murphy e Power, 2009], Amine Scrubbing [Tippayawong e Thanompongchart, 2010], PSA ("pressure swing adsorption") e separação por

membrana [Deng e Hägg, 2010; Makaruk et al., 2010; Molino et al., 2013; Scholz et al., 2013]. Diferentemente dos outros, no método AwR (“Alkali absorption with Regeneration”) o dióxido de carbono retirado do biogás não retorna para a atmosfera [Lombardi e Carnevale, 2013], reduzindo assim o impacto ambiental do processo.

O processamento de biogás ganhou atenção especial principalmente devido ao aumento das metas de uso de combustíveis renováveis em muitos países. O número de plantas de processamento de biogás no mundo que estava em torno de 20 unidades em 1999, passou para aproximadamente 100 unidades em 2009, sendo que o maior crescimento aconteceu em países europeus [Pettersson e Wellinger, 2009], gráfico pode ser visualizado no anexo A.

Após processado, as características do biogás ficam semelhantes às do gás natural devido ao alto percentual de metano presente em ambas as composições. A caracterização da mistura é feita levando-se em conta a composição do gás natural e do biometano. Uma das formas de se determinar a composição molar de misturas gasosas é através de cromatografia, sendo que, para a avaliação da incerteza é essencial que se conheça a abordagem utilizada [Oliveira e Aguiar, 2009].

Na comparação dos resultados obtidos é fundamental que se conheça a incerteza associada a esses valores. Para cálculos executados de acordo com ABNT NBR 15213, 2008, para um nível de confiança de 95%, os resultados devem ser expressos com no máximo 2 casa decimais para o poder calorífico e para o índice de Wobbe e 4 casas decimais para a massa específica e para a densidade.

2.2 Perda de carga em tubulações

A perda de carga total é considerada como a soma das perdas causadas por efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, com as perdas localizadas, causadas por efeitos de entrada, acessórios, e variações de área [Fox et al., 2006]. Para avaliar-se a perda de carga em tubulações é necessário o conhecimento do fator de atrito, sendo esse relacionado ao diâmetro e à rugosidade do material da parede do tubo e ao Reynolds do escoamento.

Na literatura é possível encontrar diversos estudos para obtenção experimental do fator de atrito para variadas situações [Langelandsvik, 2008]. Porém, a correlação estabelecida por Colebrook, 1938, ainda é uma das mais utilizadas já que apresenta bons resultados. Essa correlação serve para tubos lisos e rugosos e recebeu o nome de correlação de Colebrook-White

$$1/\sqrt{f} = -2\log(2,51/Re\sqrt{f} + k/3,7D) \quad (2.1)$$

na qual f é o fator de atrito, k é a rugosidade e D é o diâmetro. Através da correlação de Colebrook é possível verificar que para dutos de grandes diâmetros em escoamentos de baixo número de Reynolds, a rugosidade do duto possui pouca influência no fator de atrito dado comprovado experimentalmente por [Strupstad, 2009], disponível para consulta no anexo B.

Entre os exemplos de estudos numéricos encontra-se aquele de Cadorin et al., 2010, que analisaram numericamente a perda de carga para escoamento com alto número de Reynolds e alta pressão para 3 gases diferentes: gás natural, biogás1 (60% CH₄, 40% CO₂) e biogás2 (40% CH₄ e 60% CO₂). Os resultados mostraram uma maior perda de carga para o gás natural. As perdas localizadas h_{lm} podem ser calculadas através de

$$h_{lm} = K V^2 / 2 \quad (2.2)$$

onde K é o coeficiente de perda de carga e V é a velocidade de escoamento do fluido. Crane, 1982, determinou experimentalmente o coeficiente de perda de carga para alguns acessórios mais comuns presentes em tubulações. A Figura 2.1 mostra uma junção de escoamentos em conexão tipo “T”.

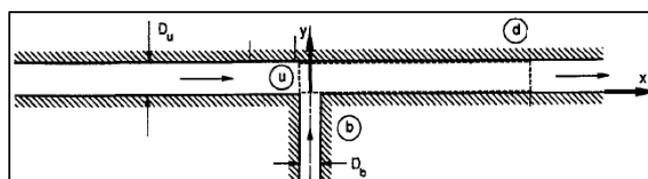


Figura 2.1 – Junção de escoamentos em conexão tipo “T”

Serre et al., 1994, propuseram a seguinte equação para o coeficiente de perda de carga em conexões de tipo “T”:

$$K_{ud} = 2(1 - \delta_b \beta_b) Q_b/Q_d - (Q_b/Q_d)^2 + (C\Delta f/\pi)(Q_b/Q_d)^2 (A_b/A_d)^{-3/2} \quad (2.3)$$

onde, A_b é área transversal do tubo menor, $\delta_b \beta_b = 0,1944$ é um fator relacionado à deflexão do fluido na entrada, A_d é a área transversal do tubo maior, Q_b é a vazão do fluido de entrada, Q_d é a vazão de saída, $C = 50$ é o fator relacionada a estabilização do escoamento após junção e Δf é o fator de atrito médio. A Eq. (2.3) produz resultados com incerteza menor que 11% e pode ser utilizada quando $A_b/A_d < 0,6$.

3 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA DE GÁS NATURAL E BIOMETANO

Pelo fato de que ainda não há um método reconhecido internacionalmente, países como Suíça, Suécia, Alemanha e França têm criado seus próprios procedimentos para injeção do biometano em rede de gás natural [Lombardi e Carnevale, 2013]. No Brasil, por exemplo, foi criada uma resolução [ANP N° 8, 2015] que especifica as características do biometano para que ele possa ser comercializado, inclusive através da injeção em redes de gás natural. Entre outras especificações, a resolução impõe a concentração molar de metano de 90,0 a 94,0 % para a região norte e o limite mínimo de 96,5 % para as demais regiões.

Para caracterização do gás natural e do biometano foram seguidos os requisitos exigíveis da norma ABNT NBR 15213, 2008. Os cálculos que serão apresentados nos capítulos seguintes foram feitos utilizando o software *EES*, para a condição de temperatura $T=293,15$ K e pressão $P= 101.325$ kPa. A rotina de cálculo pode ser consultada no Apêndice A.

3.1 Composição dos gases

Pelo fato das resoluções brasileiras de gás natural [ANP N° 16, 2008] e biometano [ANP N° 8, 2015] permitirem uma ampla faixa de variação na composição dos gases, foram considerados dados de composição fornecidos por empresas que fazem as suas comercializações.

A composição do gás natural foi considerada de acordo com dados fornecidos pela Companhia de Gás Natural do Rio Grande do Sul (Sulgás), coletados ao longo do mês de dezembro de 2014. As médias dos valores coletados estão apresentadas na Tabela 3.1.

Para a composição do biometano, foram considerados valores fornecidos pela Ecocitrus, uma das empresas que fazem a purificação do biogás, localizada em Montenegro/RS, referente a amostra coletada e ensaiada em 07/2014. A Tabela 3.1 mostra os valores considerados nos cálculos.

Tabela 3.1 – Composição dos gases. (fonte: Sulgás e Ecocitrus, 2014)

	Metano	Etano	Propano	n- Butano	i- Butano	n- Pentano	i- Pentano	n- Hexano	Nitrogênio	Dióxido de Carbono
Gás Natural	0,8931	0,0600	0,0166	0,0038	0,0022	0,0008	0,0011	0,0011	0,0070	0,0143
Biometano	0,9652	-	-	-	-	-	-	-	0,0139	0,0199

3.2 Poder calorífico

De acordo com a norma ABNT NBR 15213, 2008, o poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura e pressão iniciais dos reagentes. Quando a água formada pela reação encontra-se na forma líquida, chama-se de poder calorífico superior. Quando a água formada pela reação encontra-se na forma gasosa, chama-se de poder calorífico inferior. O cálculo do poder calorífico (PC) foi feito através de

$$PC = \sum_{j=1}^N x_j \overline{PC}_j \quad (3.1)$$

onde N é o número de componentes da mistura, x_j é a fração molar do componente j e \overline{PC}_j é o poder calorífico médio do componente j .

Os valores utilizados para o cálculo do poder calorífico encontram-se na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Poder calorífico dos componentes. (fonte: ABNT NBR 15213 [2008])

Componentes	PCS [kJ/mol]	PCI [kJ/mol]
Metano	891,09	802,65
Etano	1561,41	1428,74
Propano	2220,13	2043,23
n-Butano	2878,57	2657,45
i-Butano	2869,38	2648,26
n-Pentano	3537,17	3271,83
i-Pentano	3530,24	3264,89
n-Hexano	4196,58	3887,01
Nitrogênio	0,00	0,00
Dióxido de C	0,00	0,00
Oxigênio	0,00	0,00

A ANP através da resolução N° 16/2008, admite uma variação do poder calorífico superior para o gás para a região sul do Brasil de 35.000 a 43.000[kJ/m³] ou 842 a 1034[kJ/mol].

3.3 Massa específica e densidade relativa

A massa específica ρ é definida como a quantidade de massa por unidade de volume do gás a uma dada pressão e temperatura. Para gases ideais, pode ser calculada através da equação

$$\rho = (p/RT) \sum_{j=1}^N (x_j M_j) \quad (3.2)$$

onde T é a temperatura absoluta, R é a constante universal dos gases e M_j é a massa molar do componente j .

Densidade relativa é a relação entre a densidade absoluta de um gás e a densidade absoluta do ar seco, nas mesmas condições de temperatura e pressão. Pode ser calculada através da equação

$$d = \sum_{j=1}^N (x_j M_j / M_{ar}) \quad (3.3)$$

onde M_{ar} é a massa molar do ar de composição padrão.

3.4 Índice de Wobbe

Define-se o índice de Wobbe W como o quociente entre o poder calorífico superior PCS e a raiz quadrada da densidade relativa d , sob as mesmas condições de temperatura e pressão. Obtém-se esse índice através de

$$W \equiv PCS / \sqrt{d} \quad (3.4)$$

Para a região sul do Brasil, os limites inferior e superior do índice de Wobbe especificados pela resolução ANP N° 16 [2008] são respectivamente 46.500 e 53.500 kJ/m³.

3.5 Fator de compressibilidade

Define-se o fator de compressibilidade $Z_{(T,p)}$ como um volume real de uma massa de gás, a uma dada temperatura e pressão, dividida pelo seu volume, nas mesmas condições, calculado a partir da equação do gás ideal. Calcula-se o fator de compressibilidade através da equação

$$Z_{(T,p)} = 1 - [\sum_{j=1}^N (x_j \sqrt{b_j})]^2 \quad (3.5)$$

na qual $\sqrt{b_j}$ é o fator de adição para o componente j .

Define-se um gás ideal como um gás em que a presença de cada molécula não é influenciada pela presença das outras [Cengel e Boles, 2014]. Os cálculos serão feitos com a Lei dos Gases Ideias

$$pM = \rho RT, \quad (3.6)$$

na qual p é a pressão absoluta e M é a massa molar. Os resultados serão corrigidos para gases reais através do fator de compressibilidade $Z_{(T,p)}$.

4 MODELO MATEMÁTICO

4.1 Equações de conservação

Considerando-se escoamentos incompressíveis e turbulentos em que as forças de campo são negligenciáveis, as equações de Navier-Stokes para continuidade e conservação da quantidade de movimento são respectivamente

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{V} \bar{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (4.2)$$

onde \bar{V} é o vetor velocidade, p é a pressão estática e $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões viscosas. Obtém-se esse tensor por

$$\bar{\tau} = \mu_{eff} [(\nabla \bar{V} + \nabla \bar{V}^T) - 2/3 \nabla \cdot \bar{V} \mathbf{I}] \quad (4.3)$$

onde $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ é a viscosidade efetiva (a soma da viscosidade molecular e a viscosidade turbulenta calculado pelo modelo de turbulência), \mathbf{I} é o tensor identidade e o segundo termo do lado direito da equação está relacionado aos efeitos da dilatação volumétrica.

4.2 Modelo de turbulência

Foram feitas simulações preliminares com os modelos k - ε , k - ω *std* e k - ω SST. O modelo que apresentou convergência mais rápida para o caso proposto foi o k - ω SST, sendo esse o adotado para todas as simulações deste trabalho. As equações de transporte do modelo k - ω SST são

$$\partial / (\partial x_i) (\rho k u_i) = \partial / (\partial x_j) (\Gamma_k \partial k / (\partial x_j)) + G_k - Y_k + S_k \quad (4.4)$$

$$\partial / (\partial x_j) (\rho \omega u_j) = \partial / (\partial x_j) (\Gamma_\omega \partial \omega / (\partial x_j)) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4.5)$$

onde os termos G_k e G_ω representam a produção e a dissipação de energia cinética turbulenta respectivamente, Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω respectivamente, e Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω respectivamente. Ainda, D_ω é o termo de difusão cruzada, e S_k e S_ω são termos fonte especificáveis para k e ω respectivamente [Fluent Inc, 2012].

4.3 Transporte de espécies

A equação para o modelamento do transporte de espécies é

$$\nabla \cdot (\rho \bar{V} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i \quad (4.6)$$

onde Y_i é a fração mássica da espécie i , \bar{V} é o vetor velocidade e \bar{J}_i é a difusão mássica. Para escoamentos turbulentos \bar{J}_i é obtido por

$$\bar{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \mu_t / Sc_t) \nabla Y_i - D_{T,i} \nabla T / T \quad (4.7)$$

onde $D_{i,m}$ é o coeficiente de difusão mássica para a espécie i , $D_{T,i}$ é o coeficiente de difusão térmica e Sc_t é o número de Schimdt definido como

$$Sc_t = \mu / \rho D_{i,m} \quad (4.8)$$

5 MÉTODO NUMÉRICO

5.1 Método dos Volumes-Finitos

Adota-se o método dos volumes finitos para aproximar as equações de transporte do modelo matemático. Nesse método, as equações de transporte de um escalar ϕ para um volume de controle V com o zero no centro na célula é:

$$\sum_f \rho \phi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{a})_f = \sum_f (\Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{a})_f \quad (5.1)$$

na qual \mathbf{u} é o vetor velocidade na face f , \mathbf{a} é o vetor área na face f e Γ é a difusividade.

O termo advectivo para uma célula de face f é dado por

$$\rho \phi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{a})_f = (\dot{m} \phi)_f = \dot{m}_f \phi_f \quad (5.2)$$

onde \dot{m}_f é o fluxo mássico na face f e ϕ_f é o valor escalar. O fluxo advectivo é obtido por

$$(\dot{m} \phi)_f = \dot{m}_f \phi_{f,0} \quad \text{para } \dot{m}_f \geq 0 \quad (5.3)$$

$$(\dot{m} \phi)_f = \dot{m}_f \phi_{f,1} \quad \text{para } \dot{m}_f < 0 \quad (5.4)$$

Nas equações anteriores, os valores de $\phi_{f,0}$ e $\phi_{f,1}$ são interpolados linearmente em cada lado da face da célula através de

$$\phi_{f,0} = \phi_0 + s_0 \cdot (\nabla \phi)_0 \quad (5.5)$$

$$\phi_{f,1} = \phi_1 + s_1 \cdot (\nabla \phi)_1 \quad (5.6)$$

Os gradientes do escalar ϕ da face f das células 0 e 1 são $(\nabla \phi)_0$ e $(\nabla \phi)_1$ respectivamente, e s_0 e s_1 são os vetores distância entre os centros e faces das células. Utiliza-se o método dos mínimos quadrados de Gauss para calcular os gradientes nas faces das células os gradientes secundários dos termos difusivos, e no cálculo dos gradientes de pressão, velocidade e rotação do modelo de turbulência. O termo discreto de difusão é dado por

$$\Gamma_f \nabla \phi_f \cdot \mathbf{a} = \Gamma_f [(\phi_1 - \phi_0) \bar{\alpha} \cdot \mathbf{a} + \bar{\nabla} \phi \cdot \mathbf{a} - (\bar{\nabla} \phi \cdot \mathbf{ds}) \alpha \cdot \mathbf{a}] \quad (5.7)$$

na qual \mathbf{ds} é o vetor diferencial da direção da linha que cruza os centros das células 0 e 1, $\alpha = \mathbf{a}/(\mathbf{a} \cdot \mathbf{ds})$, $\bar{\nabla} \phi = (\nabla \phi_0 + \nabla \phi_1)/2$ e Γ_f é a média harmônica dos valores difusivos das células.

O sistema algébrico para transporte da variável ϕ na iteração $i+1$ é expresso como

$$a_p \phi_p^{i+1} + \sum_n a_n \phi_n^{i+1} = b \quad (5.8)$$

onde a soma é toda a vizinhança n da célula p . No lado direito, b representa a contribuição explícita da equação de aproximação e os coeficientes a_p e a_n são obtidos diretamente dos termos de aproximação.

Um fator de sobre relaxação ω é introduzido implicitamente como:

$$a_p/\omega \phi_p^{i+1} + \sum_n a_n \phi_n^{i+1} = b + a_p/\omega (1 - \omega) \phi_p^i \quad (5.9)$$

onde o sobre índice $i+1$ indica valor referente à iteração atual e os termos do lado direito são referentes à iteração anterior i . No entanto, ao invés de se resolver a Eq. (5.8) para os desconhecidos ϕ^{i+1} , a forma delta é usada

$$a_p/\omega \Delta \phi_p + \sum_n a_n \Delta \phi_n = b - a_p \phi_p^i - \sum_n a_n \phi_n^i \quad (5.10)$$

A aproximação do resultado é feita através da resolução do sistema linear para cada célula:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (5.11)$$

A matriz \mathbf{A} representa os coeficientes do sistema linear (os coeficientes a_p e a_n do lado esquerdo da Eq. (5.10)), o vetor \mathbf{x} representa as incógnitas de cada célula ($\Delta \phi$ do lado direito da Eq. (5.10)), e o vetor \mathbf{b} representa os resíduos (primeiro termo do lado direito da Eq. (5.10)).

O solver utilizado para resolver o sistema de equações aproximadas representado pela Eq. (5.11) foi o ANSYS Fluent, configurado para utilizar o método multi-malha (AMG) combinado com algoritmo de iteração Gauss-Seidel.

5.2 Caracterização geométrica

As características geométricas foram escolhidas levando-se em conta estudos já em fase de projeto de redes de interligação de biometano com a rede de gás natural da Sulgás. As características geométricas da tubulação principal são equivalentes às de um tubo de aço 8" Schedule 80 e às do ramal de entrada de biometano de um tubo de aço 6" Schedule 80 (conforme Figura 5.1). O comprimento do tubo foi escolhido de forma que as condições de contorno não causassem variações significativas das grandezas de escoamento na região de interesse (i.e., na região de ligação do ramal de biometano com a rede de gás natural).

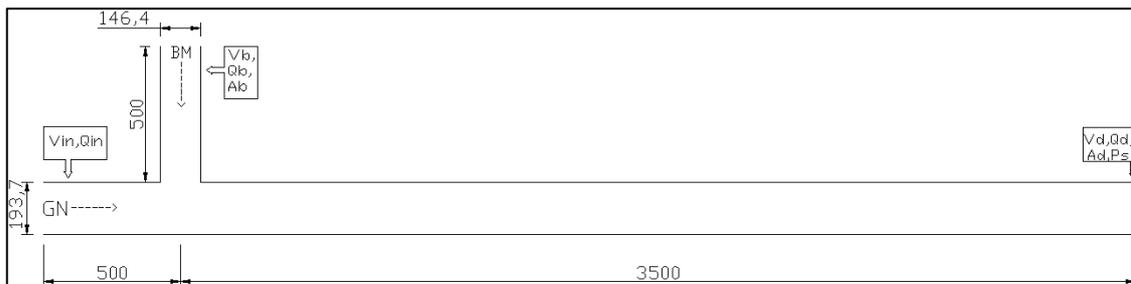


Figura 5.1 – Características geométricas (medidas em mm)

Na Figura 5.1, V_b , Q_b e A_b são, respectivamente, a velocidade, a vazão volumétrica e a área transversal do tubo de entrada de biometano. As variáveis com subíndice "in" estão relacionadas a entrada de gás natural e as variáveis com subíndice "d" estão relacionadas aos valores após a mistura dos gases. A variável P_s é a pressão de saída.

5.3 Condições de Contorno e Casos de Estudo

Para definição das condições de contorno do problema, foram considerados valores praticados [comunicação interna Sulgás, 2015] em sistemas de distribuição de gás natural. De acordo com o responsável pelo setor de projetos de redes de distribuição de gás natural da Sulgás (Companhia de Gás Natural do Estado do Rio Grande do Sul, 2015), existe uma recomendação de que a velocidade de escoamento nesses dutos seja inferior a 20 m/s e que a pressão absoluta considerada como condição de saída dos gases seja aproximadamente 1,6 MPa. Foram simulados três casos com velocidades de entrada de biometano diferentes. As condições de contorno estão expostas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Número de Mach e Reynolds

	Conc.GN [mol/mol]	ρ [kg/m ³]	Q_b [m ³ /s]	Q_{in} [m ³ /s]	V_b [m/s]	V_{in} [m/s]	V_d [m/s]	Reynolds	Mach
Caso 1	0,70	11,84	0,45	1,04	1,70	2,24	3,21	~5,0e+5	0,007
Caso 2	0,50	11,69	1,05	1,04	3,96	2,24	4,50	~7,0e+5	0,010
Caso 3	0,30	11,37	2,45	1,04	9,24	2,24	7,52	~11,7e+5	0,021

Para avaliação do escoamento utilizam-se o número de Reynolds e Mach, obtidos respectivamente, por

$$Re = (\rho \bar{V} D) / \mu \quad (5.12)$$

$$M = V / c \quad (5.13)$$

Neste trabalho, todos os casos simulados possuem $Re > 2300$, justificando a hipótese da turbulência. Outra hipótese adotada foi a de que o escoamento é incompressível, justificado pelo fato de que o maior número de Mach é 0,02.

A concentração considerada para a composição dos gases pode ser vista na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Composição dos gases considerada

	Metano	Etano	Propano	Nitrogênio	Dióxido de C
Gás Natural	0,87	0,09	0,04	-	-
Biometano	0,97	-	-	0,01	0,02

5.4 Domínio computacional e geração de malhas

Por se tratar de uma simulação de escoamento interno, o domínio computacional é limitado pelas paredes dos tubos, consideradas adiabáticas, hidraulicamente lisas e impermeáveis, sendo as malhas geradas com o software ANSYS ICEM. Após simulações preliminares, mostrou-se necessário um refinamento das malhas nas regiões de maior gradiente de pressão e próxima à parede. As regiões de refinamento de malha podem ser observadas na Figura 5.2.

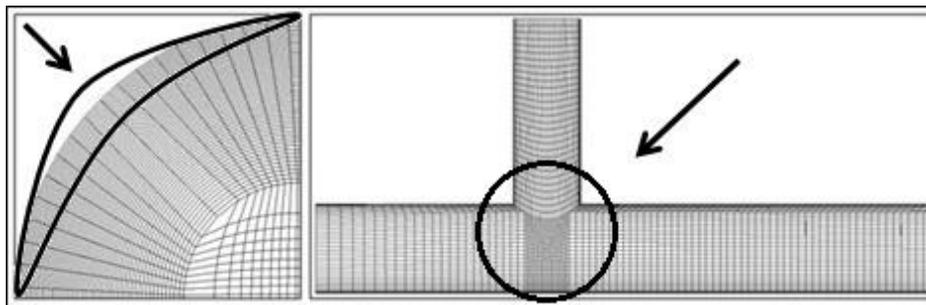


Figura 5.2 – Regiões de refinamento de malha

Além da verificação da independência dos resultados quanto ao refinamento de malha (detalhado na próxima seção), foram aplicados critérios de qualidade de malha disponíveis no software ANSYS ICEM. O critério de verificação da qualidade avalia a malha com valores de 0 a 1 e valores próximos a 0 indicam necessidade de melhorias. O método apresentou valor mínimo de 0,23, valor maior que o mínimo recomendado de 0,15, sendo que 95% das células apresentaram valor > 0,8.

Por se tratar de malhas onde o perfil de velocidade é resolvido até a parede (“low-Reynolds”), tomou-se o cuidado para que se tivesse a distância adimensional à parede $y_p^+ < 5$ ao longo de toda a parede da tubulação. Obtém-se o valor de y_p^+ por

$$y_p^+ = (y_p u^*) / \nu \quad (5.14)$$

onde y_p é a altura da camada de células adjacentes à parede, u^* é a velocidade de referência e ν é a viscosidade cinemática.

5.5 Estimativa de erros e verificação dos resultados

Os erros mensuráveis podem ser divididos em três componentes: o erro de arredondamento, o erro de iteração e o erro de discretização. Para limitar o erro de arredondamento, nas simulações apresentadas neste trabalho foi utilizada dupla precisão. O erro de iteração é a diferença entre uma solução numérica intermediária e outra convergida para a precisão da máquina. Os erros de discretização ocorrem pela representação das equações de conservação do escoamento como expressões algébricas em um domínio espacial e temporal discretos [Beck, 2014].

A estimativa da incerteza numérica dos resultados e independência de malha segue o método de extrapolação de Richardson [Roache, 1998]. Nesse método, o valor assintótico ϕ_0 do escalar ϕ é dado por

$$\phi_0 \cong \phi_1 + (\phi_1 - \phi_2) / (r_{12}^{p_{obs}} - 1) \quad (5.15)$$

onde ϕ_1 e ϕ_2 são valores calculados com malhas refinada e intermediária, respectivamente, r_{12} é o razão de refinamento entre as duas malhas, e p_{obs} é a ordem de convergência observada da malha. A razão de refinamento r_{12} é dada por

$$r_{12} = [N1/N2]^{1/3} \quad (5.16)$$

e a ordem de convergência é obtida pela solução iterativa da equação seguinte para p_{obs}

$$\epsilon_{23}\% / (r_{23}^{p_{obs}} - 1) = r_{12}^{p_{obs}} [\epsilon_{12}\% / (r_{12}^{p_{obs}} - 1)] \quad (5.17)$$

onde o subscrito “3” refere-se à malha mais grosseira. Da equação anterior, a estimativa de erro é calculada com

$$\epsilon_{n,n-1}\% = 100(\phi_n - \phi_{n-1})/\phi_{n-1} \quad (5.18)$$

onde $n=\{1,2,3\}$. O índice de convergência da malha mais refinada é calculado com

$$GCI_{12}\% = F_s |\epsilon_{12}\%| / (r_{12}^{p_{obs}} - 1) \quad (5.19)$$

onde $F_s = 1.25$ é um fator de segurança recomendado para verificação a três malhas. Considera-se que o valor assintótico ϕ_0 é independente do refinamento da malha se $\alpha/r_{12}^{p_{obs}} \approx 1$, onde $\alpha = GCI_{23}\% / GCI_{12}\%$.

Aplicando-se a metodologia para o caso 2 e utilizando como escalar a fração molar de metano em um ponto localizado nas coordenadas [1,50; 0,00; 0,08], obteve-se um índice de convergência de 1,60% que se mostra satisfatório para os objetivos do trabalho. Os resultados da verificação se encontram na Tabela 5.3, na qual N3 é a malha menos refinada, N2 é a malha intermediária e N1 é a malha mais refinada. Os resultados que serão apresentados neste trabalho foram gerados com o uso da malha N1.

Tabela 5.3 – Verificação da qualidade de malha

Malhas	Qtde	Escalar	$\epsilon_{N,N+1}$	$r_{N,N+1}$	$GCI_{N,N+1}[\%]$	p	Esc. converg.	α/r^p
N3	354.616	0,9168	-	-	-	1,0174	0,8996	1,0000
N2	652.251	0,9136	0,00351	1,2252	1,9135			1,0000
N1	1.096.756	0,9113	0,00247	1,1891	1,6043			1,0000

5.6 Validação dos resultados

Os resultados de perda de carga foram validados através da equação de Colebrook-White (Eq. (2.1)) utilizada para o cálculo das perdas de carga por efeito de atrito. Foi utilizado o caso 1, entre as posições de 3 e 4 metros da origem. Justifica-se essa escolha pelo fato de ser o local menos afetado pelas alterações provocadas no escoamento pela injeção de biometano. Através da Figura 5.3, é possível notar que os resultados simulados possuem aproximação satisfatória com a reta obtida pela literatura, ainda que a região escolhida não possua um escoamento plenamente desenvolvido.

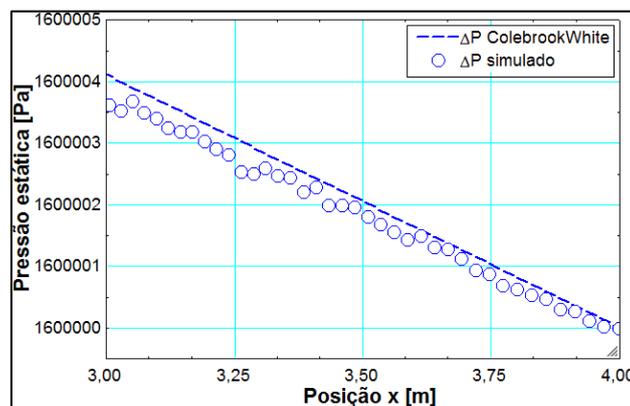


Figura 5.3 – Validação dos resultados

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos aplicando-se os princípios, a formulação matemática e o método numérico ao caso proposto de injeção de biometano em rede de gás natural.

Tabela 6.1: Propriedades para diferentes concentrações molares da mistura de GN e BM

Conc. GN	Conc. BM	PCs [kJ/mol]	PCi [kJ/mol]	Wreal [MJ/m ³]	Massa específica [kg/m ³]	Densidade rel.
0,0	1,0	860,1	774,7	47,0	0,699	0,580
0,3	0,7	888,5	801,2	48,0	0,717	0,596
0,5	0,5	907,5	818,8	48,6	0,730	0,606
0,7	0,3	926,5	836,4	49,2	0,742	0,617
1,0	0,0	955,0	862,9	50,0	0,761	0,632

A Tabela 6.1 resume os valores que serão apresentados nos itens 6.1, 6.2 e 6.3.

6.1 Poder calorífico

Através da Figura 6.1, é possível concluir que a variação do poder calorífico possui comportamento linear e que o poder calorífico da mistura aumenta com uma maior concentração molar de gás natural. Ainda, é possível verificar que, embora o biometano analisado possua poder calorífico dentro da faixa especificada pela ANP para o gás natural (PCS=842 a 1034kJ/mol), ele possui um valor de aproximadamente 10,0% inferior quando comparado com o gás natural comercializado pela Sulgás.

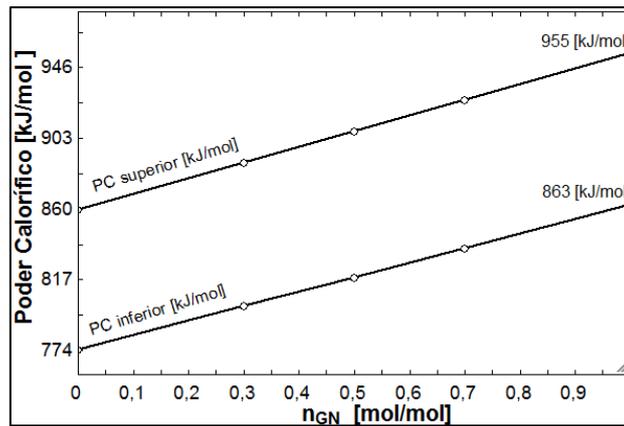


Figura 6.1: Variação do poder calorífico em função da concentração molar de GN na mistura

6.2 Densidade

A reta de variação da massa específica e da densidade relativa pode ser vista na Figura 6.2. A maior densidade do gás natural pode ser justificada pela presença de componentes mais densos na sua composição, enquanto que o biometano apresenta composição de basicamente metano. A densidade do biometano quando comparado com o gás natural foi de aproximadamente 8,2% inferior. Não consta nas resoluções da ANP especificação para a densidade desses combustíveis.

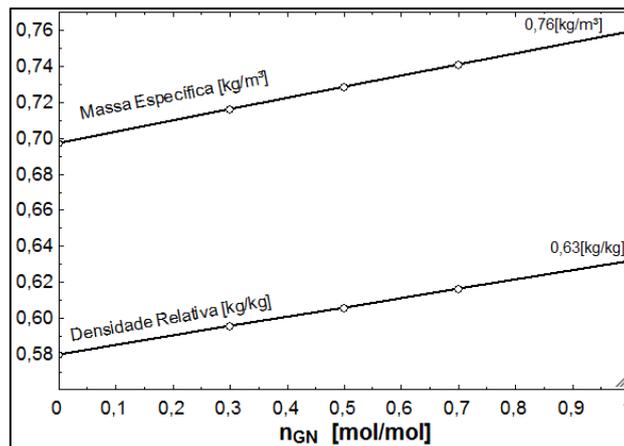


Figura 6.2: Variação da massa específica e densidade relativa x concentração molar de GN na mistura

6.3 Índice de Wobbe

A Figura 6.3 mostra a reta de variação do índice de Wobbe desde o biometano até o gás natural. A variação máxima do índice de Wobbe foi de aproximadamente 6,0% comparando-se os casos de biometano puro ($n_{gn} = 0$) e gás natural puro ($n_{gn} = 1$). Pode-se perceber através do gráfico que o índice de Wobbe dos gases está dentro da faixa especificada pela ANP (46,5 a 53,50 MJ/m³). É possível constatar também que, embora a variação de poder calorífico tenha sido da ordem de 10%, a variação do índice de Wobbe foi menor. Isso mostra que os gases possuem características de queima semelhantes.

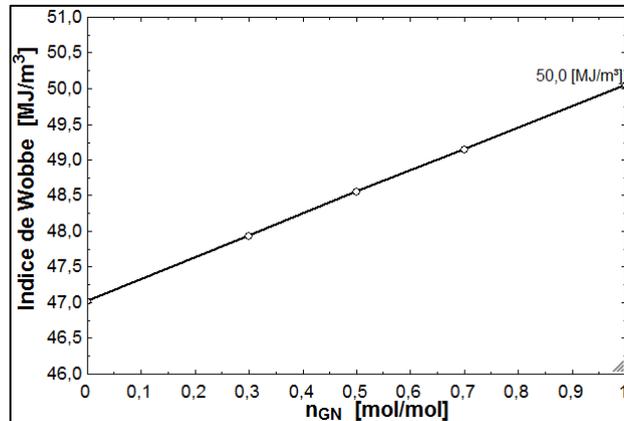


Figura 6.3: Variação do Índice de Wobbe em função da concentração molar de GN na mistura

6.4 Perda de carga

A Tabela 6.2 apresenta a perda de carga total ocorrida nos 4 metros de tubulação.

Tabela 6.2 – Valores de perda de carga

		Caso 1	Caso 2	Caso 3
ΔP [Pa]	Literatura	73,35	195,17	652,26
	Simulação	70,15	180,03	571,13
Diferença [%]		4,56	8,41	14,21

Embora não se tenha resultado experimental para o caso específico, acredita-se que o uso da correlação de Colebrook-White Eq. (2.1) combinada com o uso do fator de atrito Eq. (2.3) proposto por Serre et al., 1994 seja adequada para determinação da perda de carga nos casos 1 e 2. Diferentemente do caso 3, que apresentou diferença superior a 14%. O motivo para o crescente aumento da discrepância pode ser resultado da utilização da correlação de Colebrook White para casos cada vez mais distantes da hipótese de escoamento plenamente desenvolvido. A variação da pressão estática ao longo de pontos no centro do tubo principal para os três casos simulados está representada na Figura 6.4.

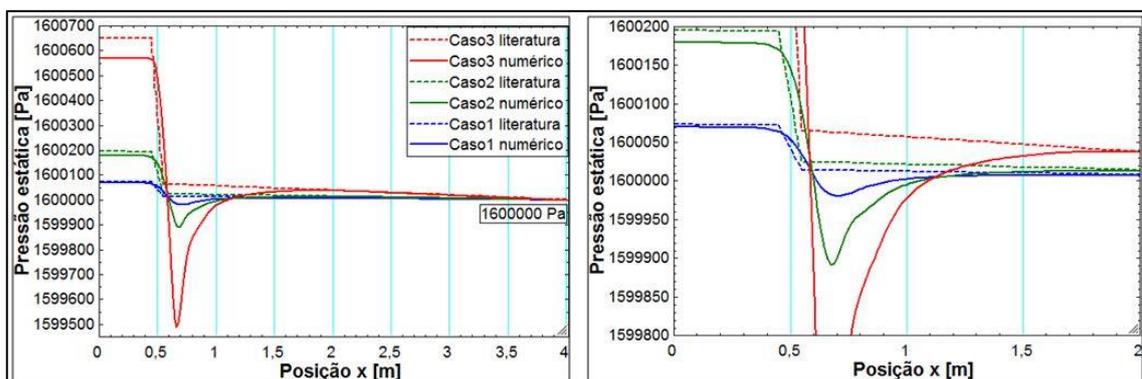


Figura 6.4 – Perda de carga

A Figura 6.5 apresenta o campo de velocidade na região de injeção de biometano, onde as cores em tons azulados representam velocidades próximas a zero e as cores em tons avermelhados representam velocidades próximas a 15 m/s.

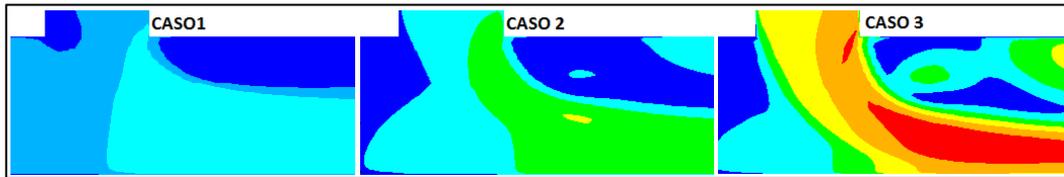


Figura 6.5 – Região de injeção do biometano

Através da Figura 6.5 é possível perceber que ocorre uma aceleração local do fluido logo após a injeção de biometano. Essa variação de velocidade é maior para o caso 2 e ainda maior para o caso 3. Essa aceleração local do fluido justifica as quedas de pressão apresentadas graficamente entre os pontos $x = 0,5 \text{ m}$ e $x = 1,0 \text{ m}$ na Figura 6.4.

6.5 Homogeneização da mistura

A Figura 6.6 mostra a variação de concentração molar de metano em um plano que cruza o centro das tubulações. É possível verificar que a mistura dos gases acontece antes nos casos de maior número de Reynolds.

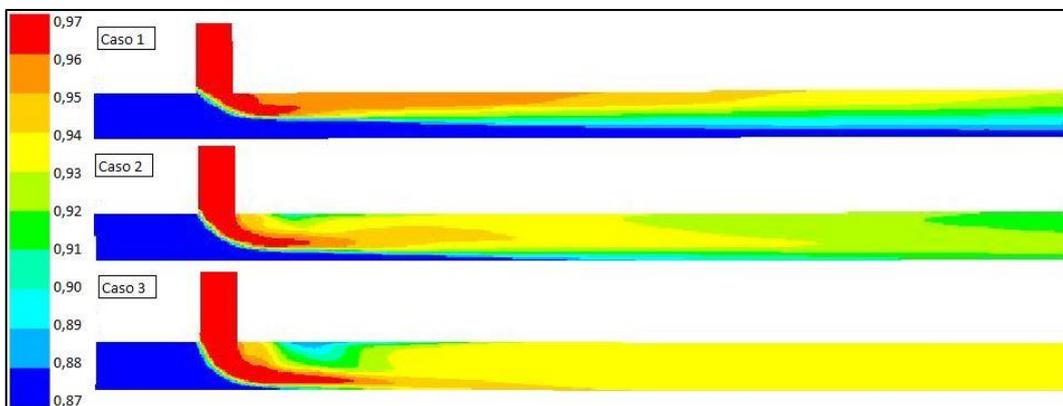


Figura 6.6 – Variação de concentração molar de CH4 para os três casos

A distância necessária para homogeneização da mistura será avaliada através da variação da concentração molar de metano ao longo de pontos no centro do tubo principal. A Figura 6.7 mostra essa variação para os três casos simulados.

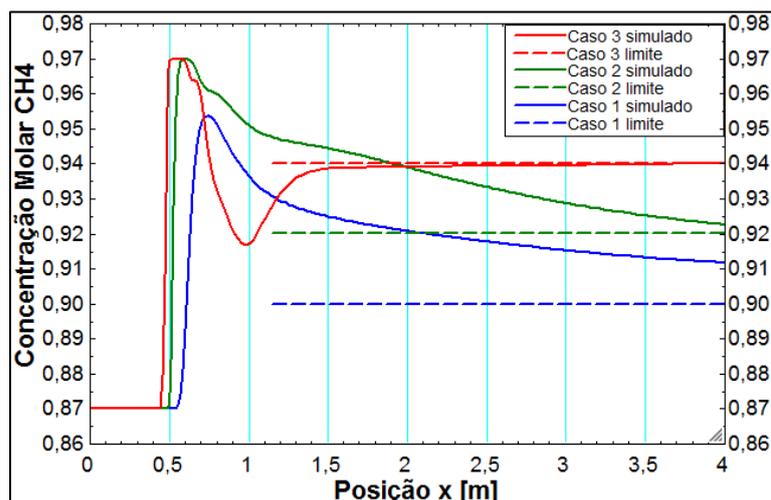


Figura 6.7 – Concentração molar de biometano

A mistura será considerada homogênea no local em que a derivada da concentração molar de metano em relação à posição “x” for igual a zero com três casas decimais e a curva estiver acima do valor limite indicado na Figura 6.7. Com a aplicação deste critério, é possível concluir que a homogeneização do caso 3 ocorre na posição $x \sim 2,12\text{m}$. Para os casos 1 e 2, não há homogeneização dentro da região simulada.

7 CONCLUSÕES

Os principais parâmetros de caracterização, a perda de carga e o comprimento necessário para homogeneização da injeção de biometano em rede de gás natural foram investigados nesse trabalho. A motivação pela escolha do tema fundamentou-se pela necessidade de maior detalhamento técnico no assunto, em um momento em que a utilização de biocombustíveis é vista como uma alternativa economicamente viável por especialistas em energia.

Através da análise dos parâmetros poder calorífico, densidade e índice de Wobbe é possível afirmar que os valores desses parâmetros são menores (10,0%, 8,2% e 6,0% respectivamente) para o biometano quando comparados aos valores do gás natural. A diferença diminui linearmente na medida em que a participação do biometano na mistura com gás natural diminui. A perda de carga e o comprimento necessário para homogeneização da mistura foram obtidos através de simulação numérica. Foram simulados 3 casos com variação apenas da velocidade de injeção de biometano. No caso 1 a velocidade foi de 1,70m/s, no caso 2 foi de 3,96m/s e no caso 3 foi de 9,24m/s. Obteve-se um resultado satisfatório com a utilização da correlação de Colebrook-White Eq. (2.1) combinada com o uso do fator de atrito Eq. (2.3) proposto por Serre et al., 1994 para os casos 1 e 2, diferentemente para o caso 3, no qual a diferença foi superior a 14%. O motivo do aumento da discrepância entre os resultados dá-se pelo fato de que com o aumento da velocidade de injeção de biometano tem-se um escoamento cada vez mais afastado da hipótese de plenamente desenvolvido. A distância necessária para homogeneização da mistura dos gases para o caso 3 foi de aproximadamente 2,12m. Para os casos 1 e 2 não ocorreu homogeneização dentro da região simulada. Pôde-se concluir que a mistura acontece mais rapidamente nos casos de maior número de Reynolds.

Embora não se tenha comprovação experimental, considera-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, uma vez que os resultados obtidos possam servir de apoio para a implantação de novas tecnologias relacionadas à injeção de biometano em rede de gás natural e base estudos relacionados ao tema. Deixa-se como sugestão de continuidade o estudo experimental dos casos analisados nesse trabalho, como também de novos casos como, por exemplo, a análise dos mesmos fenômenos com a variação da velocidade de escoamento do gás da tubulação principal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. **Biogas Energy**. New York: Springer Science & Business Media, 2011. v. 2

ABNT. NBR 15213. Gás natural e outros combustíveis gasosos - Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de Wobbe a partir da composição. . 15 out. 2008.

ANP. Resolução N° 16, de 16.06.2008 - DOU 18.06.2008. Estabelece a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo território nacional. . 17 jun. 2008.

ANP. Resolução N° 8, de 30.1.2015 - DOU 2.2.2015. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP n° 1/2015. . 30 jan. 2015.

BECK, P. A. **Análise Numérica sobre a Redução de Arrasto pela Aplicação de Microcanais em Superfícies Visando a Aplicações Aerodinâmicas**. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dez. 2014.

BROWNE, J. et al. Assessing the cost of biofuel production with increasing penetration of the transport fuel market: A case study of gaseous biomethane in Ireland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4537–4547, 2011.

CADORIN, M.; MORINI, M.; PINELLI, M. Numerical analyses of high Reynolds number flow of high pressure fuel gas through rough pipes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 14, p. 7568–7579, jul. 2010.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach, SI Version**. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2014.

COLEBROOK, C. F. Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rought Pipe Laws. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, p. 133–156, 1938.

COMPANHIA DE GÁS NATURAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Comunicação interna**, 2015.

COSTA, M.; COELHO, P. **COMBUSTAO**. Portugal: Orion, 2007.

CRANE, C. flow-of-fluids-through-valve-fittings-and-pipes. **flow-of-fluids-through-valve-fittings-and-pipes**, 1982.

DENG, L.; HÄGG, M.-B. Techno-economic evaluation of biogas upgrading process using CO₂ facilitated transport membrane. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 4, p. 638–646, 2010.

ECOCITRUS. **Comunicação interna**, 2015.

FLUENT INC. **Ansys Fluent 12.0-Theory Guide**. Ansys, 2009.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. [s.l.] LTC, 2006.

LANGELANDSVIK, L. I. **Modeling of natural gas transport and friction factor for large-scale pipelines: Laboratory experiments and analysis of operational data.** [s.l.] Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 2008.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E. Economic evaluations of an innovative biogas upgrading method with CO₂ storage. **Energy**, v. 62, p. 88–94, Dezembro 2013.

MAKARUK, A.; MILTNER, M.; HARASEK, M. Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute. **Separation and Purification Technology**, v. 74, n. 1, p. 83–92, 2010.

MOLINO, A. et al. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. **Fuel**, v. 103, p. 1003–1009, 2013.

MONTEIRO, S. D. DA S. C. **Produção de Biometano_Análise de mercado e estudo da separação por PSA.** Porto, Portugal: Universidade do porto, jul. 2011.

MURPHY, J. D.; POWER, N. M. An argument for using biomethane generated from grass as a biofuel in Ireland. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 504–512, 2009.

OLIVEIRA, E. C. DE; AGUIAR, P. F. DE. Comparação de diferentes abordagens para avaliação da incerteza na cromatografia gasosa do gás natural. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1655–1660, 2009.

PETERSSON, A.; WELLINGER, A. Biogas upgrading technologies - Developments and innovations. **IEA Bioenergy Task 37-Energy From Biogas and Landfill Gas**, 2009.

ROACHE, P. J. Verification and Validation in Computational Science and Engineering. **Hermosa Publishers**, 1998.

Scania e Itaipu testam ônibus a biometano. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/21026/scania-e-itaipu-testam-onibus-a-biometano>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

SCHOLZ, M.; MELIN, T.; WESSLING, M. Transforming biogas into biomethane using membrane technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 17, p. 199–212, 2013.

SERRE, M.; ODGAARD, A. J.; ELDER, R. A. Energy loss at combining pipe junction. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 120, n. 7, p. 808–830, 1994.

STRUPSTAD, A. **Pressure Loss in Natural Gas Pipelines: Experimental Studies of Gas-Particle Flow, Wall Roughness and Drag Reduction.** [s.l.] Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, 2009.

TIPPAYAWONG, N.; THANOMPONGCHART, P. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. **Energy**, v. 35, n. 12, p. 4531–4535, 2010.

APENDICE A – ROTINA DE CÁLCULO PARA CARACTERIZAÇÃO NO SOFTWARE EES

{Preencher Fração Molar Composição Gás Natural - não normalizada}

CompGN_metano=0,8929 [(mol/mol)]
 CompGN_etano=0,0600 [(mol/mol)]
 CompGN_propano=0,0166 [(mol/mol)]
 CompGN_nbutano=0,0038 [(mol/mol)]
 CompGN_ibutano=0,0022 [(mol/mol)]
 CompGN_npentano=0,0008 [(mol/mol)]
 CompGN_ipentano=0,0011 [(mol/mol)]
 CompGN_nhexano=0,0011 [(mol/mol)]
 CompGN_nitrogenio=0,0070 [(mol/mol)]
 CompGN_dioxidocarb=0,0143 [(mol/mol)]
 CompGN_somatorio=CompGN_metano+CompGN_etano+CompGN_propano+CompGN_nbutano+CompGN_ibutano+CompGN_npentano+CompGN_ipentano+CompGN_nhexano+CompGN_nitrogenio+CompGN_dioxidocarb

{Preencher Composição Biometano - não normalizada}

CompBM_metano=0,9700 [(mol/mol)]
 CompBM_nitrogenio=0,0140 [(mol/mol)]
 CompBM_dioxidocarb=0,0200 [(mol/mol)]
 CompBM_oxigenio=0,0010 [(mol/mol)]
 CompBM_somatorio=CompBM_metano+CompBM_nitrogenio+CompBM_dioxidocarb+CompBM_oxigenio

{Composição Gás Natural normalizada}

CompNormalizadaGN_metano=CompGN_metano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_etano=CompGN_etano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_propano=CompGN_propano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_nbutano=CompGN_nbutano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_ibutano=CompGN_ibutano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_npentano=CompGN_npentano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_ipentano=CompGN_ipentano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_nhexano=CompGN_nhexano/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_nitrogenio=CompGN_nitrogenio/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_dioxidocarb=CompGN_dioxidocarb/CompGN_somatorio
 CompNormalizadaGN_somatorio=CompNormalizadaGN_metano+CompNormalizadaGN_etano+CompNormalizadaGN_propano+CompNormalizadaGN_nbutano+CompNormalizadaGN_ibutano+CompNormalizadaGN_npentano+CompNormalizadaGN_ipentano+CompNormalizadaGN_nhexano+CompNormalizadaGN_nitrogenio+CompNormalizadaGN_dioxidocarb

{Composição Biometano normalizada}

CompNormalizadaBM_metano=CompBM_metano/CompBM_somatorio
 CompNormalizadaBM_nitrogenio=CompBM_nitrogenio/CompBM_somatorio
 CompNormalizadaBM_dioxidocarb=CompBM_dioxidocarb/CompBM_somatorio
 CompNormalizadaBM_oxigenio=CompBM_oxigenio/CompBM_somatorio
 CompNormalizadaBM_somatorio=CompNormalizadaBM_metano+CompNormalizadaBM_nitrogenio+CompNormalizadaBM_dioxidocarb+CompNormalizadaBM_oxigenio

{Poder Calorífico Superior ideal em base molar 20° e 101,325kPa}

PCS_metano=891,09 [kJ/mol]
 PCS_etano=1561,41 [kJ/mol]
 PCS_propano=2220,13 [kJ/mol]
 PCS_nbutano=2878,57 [kJ/mol]
 PCS_ibutano=2869,38 [kJ/mol]
 PCS_npentano=3537,17 [kJ/mol]
 PCS_ipentano=3530,24 [kJ/mol]
 PCS_nhexano=4196,58 [kJ/mol]
 PCS_nitrogenio=0,00 [kJ/mol]
 PCS_dioxidocarb=0,00 [kJ/mol]
 PCS_oxigenio=0,00 [kJ/mol]

{Poder Calorífico Inferior ideal em base molar 20° e 101,325kPa}

PCI_metano=802,65 [kJ/mol]
 PCI_etano=1428,74 [kJ/mol]
 PCI_propano=2043,23 [kJ/mol]

```

PCI_nbutano=2657,45 [kJ/mol]
PCI_ibutano=2648,26 [kJ/mol]
PCI_npentano=3271,83 [kJ/mol]
PCI_ipentano=3264,89 [kJ/mol]
PCI_nhexano=3887,01 [kJ/mol]
PCI_nitrogenio=0,00 [kJ/mol]
PCI_dioxidocarb=0,00 [kJ/mol]
PCI_oxigenio=0,00 [kJ/mol]
{Fator de compressibilidade}
T1=293,15 [K]
P1=Po#
Z_metano=CompressibilityFactor(Methane;T=T1;P=P1)
Z_etano=CompressibilityFactor(Ethane;T=T1;P=P1)
Z_propano=CompressibilityFactor(Propane;T=T1;P=P1)
Z_nbutano=CompressibilityFactor(n-Butane;T=T1;P=P1)
Z_ibutano=CompressibilityFactor(Isobutane;T=T1;P=P1)
{Z_npentano=CompressibilityFactor(n-Pentane;T=T1;P=P1)
Z_ipentano=CompressibilityFactor(Isopentane;T=T1;P=P1)
Z_nhexano=CompressibilityFactor(n-Hexane;T=T1;P=P1)}
Z_npentano=0,945
Z_ipentano=0,953
Z_nhexano=0,919
Z_nitrogenio=CompressibilityFactor(Nitrogen;T=T1;P=P1)
Z_dioxidocarb=CompressibilityFactor(CarbonDioxide;T=T1;P=P1)
Z_oxigenio=CompressibilityFactor(Oxygen;T=T1;P=P1)
Z_ar=CompressibilityFactor(Air_ha;T=T1;P=P1)
{Massa molar dos componentes reais}
M_metano=MolarMass(Methane)
M_etano=MolarMass(Ethane)
M_propano=MolarMass(Propane)
M_nbutano=MolarMass(n-Butane)
M_ibutano=MolarMass(Isobutane)
M_npentano=MolarMass(n-Pentane)
M_ipentano=MolarMass(Isopentane)
M_nhexano=MolarMass(n-Hexane)
M_nitrogenio=MolarMass(Nitrogen)
M_dioxidocarb=MolarMass(CarbonDioxide)
M_oxigenio=MolarMass(Oxygen)
{M_ar seco=MolarMass(Air_ha)}
M_ar seco=28,9626
{Massa molar da mistura}
M_gn=(CompNormalizadaGN_metano*M_metano+CompNormalizadaGN_etano*M_etano+CompNormali
zadaGN_propano*M_propano+CompNormalizadaGN_nbutano*M_nbutano+CompNormalizadaGN_ibuta
no*M_ibutano+CompNormalizadaGN_npentano*M_npentano+CompNormalizadaGN_nhexano*M_nhexa
no+CompNormalizadaGN_ipentano*M_ipentano+CompNormalizadaGN_nitrogenio*M_nitrogenio+Comp
NormalizadaGN_dioxidocarb*M_dioxidocarb)
M_bm=(CompNormalizadaBM_metano*M_metano+CompNormalizadaBM_nitrogenio*M_nitrogenio+Com
pNormalizadaBM_dioxidocarb*M_dioxidocarb+CompNormalizadaBM_oxigenio*M_oxigenio)
M_mistura=n_GN*M_gn+n_BM*M_bm
{concentração molar da mistura}
n_GN+n_BM=n_mistura
n_mistura=1
$ifnot ParametricTable
n_GN=0,7
$endif
{Fator de compressibilidade}
Z_gn=1-(CompNormalizadaGN_metano*sqrt(1-Z_metano)+CompNormalizadaGN_etano*sqrt(1-
Z_etano)+CompNormalizadaGN_propano*sqrt(1-Z_propano)+CompNormalizadaGN_nbutano*sqrt(1-
Z_nbutano)+CompNormalizadaGN_ibutano*sqrt(1-Z_ibutano)+CompNormalizadaGN_npentano*sqrt(1-
Z_npentano)+CompNormalizadaGN_nhexano*sqrt(1-
Z_nhexano)+CompNormalizadaGN_ipentano*sqrt(1-

```

$Z_{\text{ipentano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{nitrogenio}} \cdot \sqrt{1 - Z_{\text{nitrogenio}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{dioxidocarb}} \cdot \sqrt{1 - Z_{\text{dioxidocarb}}}}^{**2}$
 $Z_{\text{bm}} = 1 - (\text{CompNormalizadaBM}_{\text{metano}} \cdot \sqrt{1 - Z_{\text{metano}}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{nitrogenio}} \cdot \sqrt{1 - Z_{\text{nitrogenio}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{dioxidocarb}} \cdot \sqrt{1 - Z_{\text{dioxidocarb}}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{oxigenio}} \cdot \sqrt{1 - Z_{\text{oxigenio}}})^{**2}$
 $Z_{\text{mistura}} = n_{\text{GN}} \cdot Z_{\text{gn}} + n_{\text{BM}} \cdot Z_{\text{bm}}$
 {Poder Calorífico Superior real/ideal em base molar}
 $\text{PCS}_{\text{gn}} = \text{CompNormalizadaGN}_{\text{metano}} \cdot \text{PCS}_{\text{metano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{etano}} \cdot \text{PCS}_{\text{etano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{propano}} \cdot \text{PCS}_{\text{propano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{nbutano}} \cdot \text{PCS}_{\text{nbutano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{ibutano}} \cdot \text{PCS}_{\text{ibutano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{npentano}} \cdot \text{PCS}_{\text{npentano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{nhexano}} \cdot \text{PCS}_{\text{nhexano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{ipentano}} \cdot \text{PCS}_{\text{ipentano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{nitrogenio}} \cdot \text{PCS}_{\text{nitrogenio}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{dioxidocarb}} \cdot \text{PCS}_{\text{dioxidocarb}}$
 $\text{PCS}_{\text{bm}} = \text{CompNormalizadaBM}_{\text{metano}} \cdot \text{PCS}_{\text{metano}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{nitrogenio}} \cdot \text{PCS}_{\text{nitrogenio}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{dioxidocarb}} \cdot \text{PCS}_{\text{dioxidocarb}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{oxigenio}} \cdot \text{PCS}_{\text{oxigenio}}$
 $\text{PCS}_{\text{mistura}} = n_{\text{GN}} \cdot \text{PCS}_{\text{gn}} + n_{\text{BM}} \cdot \text{PCS}_{\text{bm}}$
 {Poder Calorífico Superior ideal em base volumétrica}
 $\text{PCSvol}_{\text{gn}} = \text{PCS}_{\text{gn}} \cdot da_{\text{gn}} / M_{\text{gn}}$
 $\text{PCSvol}_{\text{bm}} = \text{PCS}_{\text{bm}} \cdot da_{\text{bm}} / M_{\text{bm}}$
 $\text{PCSvol}_{\text{mistura}} = n_{\text{GN}} \cdot \text{PCSvol}_{\text{gn}} + n_{\text{BM}} \cdot \text{PCSvol}_{\text{bm}}$
 {Poder Calorífico Superior real em base volumétrica}
 $\text{PCSvolreal}_{\text{gn}} = \text{PCS}_{\text{gn}} \cdot d_{\text{areal}}_{\text{gn}} / M_{\text{gn}}$
 $\text{PCSvolreal}_{\text{bm}} = \text{PCS}_{\text{bm}} \cdot d_{\text{areal}}_{\text{bm}} / M_{\text{bm}}$
 $\text{PCSvolreal}_{\text{mistura}} = n_{\text{GN}} \cdot \text{PCSvolreal}_{\text{gn}} + n_{\text{BM}} \cdot \text{PCSvolreal}_{\text{bm}}$
 {Poder Calorífico Inferior real/ideal em base molar}
 $\text{PCI}_{\text{gn}} = \text{CompNormalizadaGN}_{\text{metano}} \cdot \text{PCI}_{\text{metano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{etano}} \cdot \text{PCI}_{\text{etano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{propano}} \cdot \text{PCI}_{\text{propano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{nbutano}} \cdot \text{PCI}_{\text{nbutano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{ibutano}} \cdot \text{PCI}_{\text{ibutano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{npentano}} \cdot \text{PCI}_{\text{npentano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{nhexano}} \cdot \text{PCI}_{\text{nhexano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{ipentano}} \cdot \text{PCI}_{\text{ipentano}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{nitrogenio}} \cdot \text{PCI}_{\text{nitrogenio}} + \text{CompNormalizadaGN}_{\text{dioxidocarb}} \cdot \text{PCI}_{\text{dioxidocarb}}$
 $\text{PCI}_{\text{bm}} = \text{CompNormalizadaBM}_{\text{metano}} \cdot \text{PCI}_{\text{metano}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{nitrogenio}} \cdot \text{PCI}_{\text{nitrogenio}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{dioxidocarb}} \cdot \text{PCI}_{\text{dioxidocarb}} + \text{CompNormalizadaBM}_{\text{oxigenio}} \cdot \text{PCI}_{\text{oxigenio}}$
 $\text{PCI}_{\text{mistura}} = n_{\text{GN}} \cdot \text{PCI}_{\text{gn}} + n_{\text{BM}} \cdot \text{PCI}_{\text{bm}}$
 {densidade relativa do gás ideal}
 $dr_{\text{GN}} = M_{\text{gn}} / M_{\text{arseco}}$
 $dr_{\text{BM}} = M_{\text{bm}} / M_{\text{arseco}}$
 $dr_{\text{mistura}} = n_{\text{GN}} \cdot dr_{\text{GN}} + n_{\text{BM}} \cdot dr_{\text{BM}}$
 {densidade relativa do gás real}
 $dr_{\text{real}}_{\text{GN}} = dr_{\text{GN}} \cdot Z_{\text{ar}} / Z_{\text{gn}}$
 $dr_{\text{real}}_{\text{BM}} = dr_{\text{BM}} \cdot Z_{\text{ar}} / Z_{\text{bm}}$
 $dr_{\text{real}}_{\text{mistura}} = n_{\text{GN}} \cdot dr_{\text{real}}_{\text{GN}} + n_{\text{BM}} \cdot dr_{\text{real}}_{\text{BM}}$
 {densidade absoluta ideal}
 $da_{\text{gn}} = P1 \cdot M_{\text{gn}} / (R \cdot T1)$
 $da_{\text{bm}} = P1 \cdot M_{\text{bm}} / (R \cdot T1)$
 $da_{\text{mistura}} = P1 \cdot M_{\text{mistura}} / (R \cdot T1)$
 {densidade absoluta real}
 $d_{\text{areal}}_{\text{gn}} = da_{\text{gn}} / Z_{\text{gn}}$
 $d_{\text{areal}}_{\text{bm}} = da_{\text{bm}} / Z_{\text{bm}}$
 $d_{\text{areal}}_{\text{mistura}} = da_{\text{mistura}} / Z_{\text{mistura}}$
 {índice de wobble do gás ideal}
 $W_{\text{ideal}}_{\text{gn}} = \text{PCSvol}_{\text{gn}} / \sqrt{dr_{\text{GN}}}$
 $W_{\text{ideal}}_{\text{bm}} = \text{PCSvol}_{\text{bm}} / \sqrt{dr_{\text{BM}}}$
 $W_{\text{ideal}}_{\text{mistura}} = \text{PCSvol}_{\text{mistura}} / \sqrt{dr_{\text{mistura}}}$
 {índice de wobble do gás real}
 $W_{\text{real}}_{\text{gn}} = \text{PCSvolreal}_{\text{gn}} / \sqrt{dr_{\text{real}}_{\text{GN}}}$
 $W_{\text{real}}_{\text{bm}} = \text{PCSvolreal}_{\text{bm}} / \sqrt{dr_{\text{real}}_{\text{BM}}}$
 $W_{\text{real}}_{\text{mistura}} = \text{PCSvolreal}_{\text{mistura}} / \sqrt{dr_{\text{real}}_{\text{mistura}}}$
 {PCS range da ABNT em kJ/m³}
 $\text{PCSlimiteinf} = 35 \cdot (da_{\text{gn}} / M_{\text{gn}})^{-1}$
 $\text{PCSlimitesup} = 43 \cdot (da_{\text{gn}} / M_{\text{gn}})^{-1}$

ANEXO A – EVOLUÇÃO DAS PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE BIOGÁS

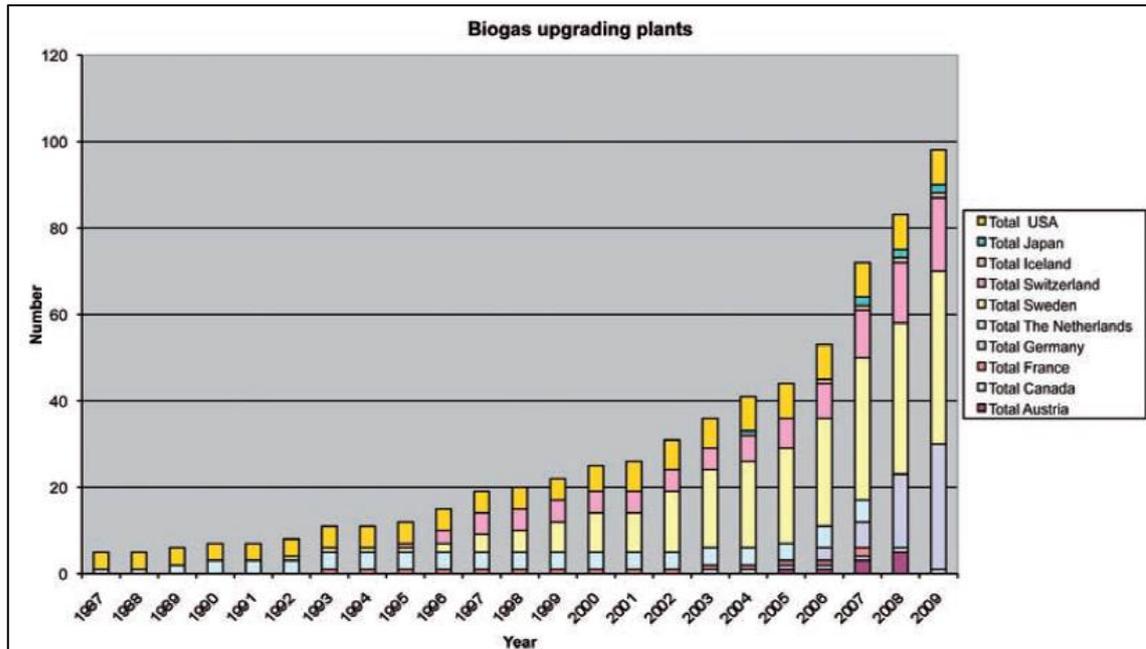


Figura Anexo A: Número total de plantas de processamento de biogás entre 1987 e 2009.
(fonte: PETERSSON; WELLINGER, 2009)

ANEXO B – VARIAÇÃO DO FATOR DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS

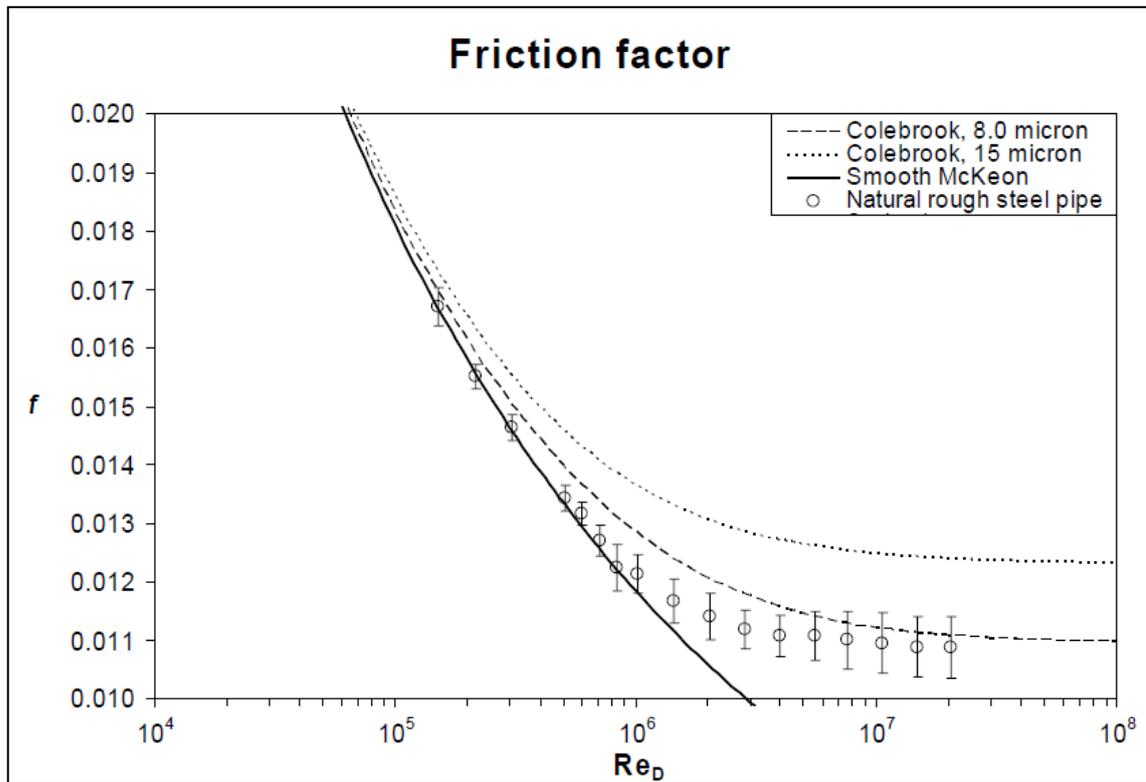


Figura Anexo B: Medições de fator de atrito. (fonte: STRUPSTAD, 2009)