



**Mariana Bragança Pereira**

**Projeto e ensaios de um pré-vaporizador para  
a combustão de uma mistura de etanol e de  
ar**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Luis Fernando Figueira da Silva

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2018

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente à toda a minha família, amigos e meu namorado, por todo o amor, apoio e incentivo que deram durante toda a minha vida, e em especial à minha mãe, que foi quem me levou para o meu primeiro dia de aula na escola (onde eu entrei correndo, animada, e ela ficou chorando no portão, emocionada), dando início ao primeiro passo para essa minha longa jornada nos estudos que estava por vir.

Agradeço também ao professor Fernando Magalhães - que me veio à cabeça enquanto escrevia os agradecimentos - que lecionava matemática na escola Carmelita Couto no ano de 2006, em Cuiabá/MT, minha terra natal. Foi ele quem me fez adorar a matemática e consequentemente as outras áreas das ciências exatas, o que contribuiu para escolher a Engenharia.

Agradeço à PUC-RIO e a todos os professores amigos, por me fornecerem toda a estrutura e um ensino de qualidade, e ao meu professor-orientador, por toda a ajuda, dedicação, tempo e por estar sempre presente.

Aprendi com a Engenharia que tudo o que queremos torna-se possível, que somos capazes de fazer qualquer coisa, basta dedicação e paciência. Isso me transformou em alguém mais confiante e eficiente para realizar as tarefas diárias, principalmente no trabalho.

Este trabalho é inteiramente dedicado ao Schülling, o ser mais puro e bondoso que esse planeta já habitou.

## **Resumo**

### **Projeto e ensaios de um pré-vaporizador para a combustão de uma mistura de etanol e de ar**

Este presente trabalho consta em realizar a vaporização de etanol em um queimador de regime turbulento (BEST Flame).

Inicialmente, foi realizado um estudo numérico das propriedades geométricas, adimensionais e térmicas para garantir o aquecimento de etanol.

Foi decidida a metodologia dos leitos recheados para fornecer uma troca de calor entre o tubo e o etanol, já que somente com a ebulição, a troca de calor não era satisfatória.

Foi realizado uma calibração do medidor de vazão e um estudo de custos de bilhas esféricas.

Antes do ensaio com etanol, por medidas de segurança e verificar o bom funcionamento dos equipamentos, foi feito um ensaio com água.

Em seguida, foi realizado o ensaio com etanol e conseguimos vaporizar e gerar uma combustão estabilizada em pequenas faixas de vazões de etanol.

## **Palavras-chave**

Combustão etanol-ar; Pré-vaporizador; Leitos recheados; BEST Flame.

## **Abstract**

### **Design and tests of a pre-vaporizer for combustion of ethanol and air mixtures**

This present work consists in performing the vaporization of ethanol in a turbulent regime burner (BEST Flame).

Initially, a numerical study of geometric, dimensionless and thermal properties was carried out to guarantee the heating of ethanol.

The methodology of the fixed beds was decided to provide a heat exchange between the tube and the ethanol, but only with the boiling, the heat exchange was not satisfactory. A flow meter calibration and a cost study of spheres were performed.

Before the ethanol test, for safety measures and to verify the proper functioning of the equipment, a water test was carried out.

Then the ethanol test was carried out and we were able to vaporize and generate a stabilized combustion in small ranges of ethanol flows.

## **Keywords**

Ethanol-air combustion; Pre-vaporizer; Fixed-beds; BEST Flame.

## Sumário

1	Introdução	<b>9</b>
1.1	Introdução geral	9
1.2	Introdução específica	10
1.3	Objetivos	10
1.3.1	Organização do trabalho	11
2	Formulação matemática do problema	<b>12</b>
2.1	Balanço global de energia	12
2.2	Transferência e propagação de calor	13
2.2.1	Condução	13
2.2.2	Convecção	14
2.3	Ebulição	14
2.4	Leitos recheados	16
2.5	Cálculos geométricos	19
2.6	Esquematização do cálculo do dimensionamento	20
3	Dimensionamento do aquecedor	<b>22</b>
3.1	Possíveis soluções para aquecimento de baixas vazões de etanol	22
3.2	Estudo da transferência de calor por ebulição em um tubo	23
3.2.1	Especificações do sistema de aquecimento	23
3.2.2	Estudo geométrico do comprimento aquecido	23
3.3	Estudo da transferência de calor por leitos recheados	24
3.3.1	Especificações do sistema de aquecimento	24
3.3.2	Estudo da configuração geométrica	25
3.3.3	Estudo dos números adimensionais	27
	Ar	28
	Água	29
	Etanol	30
3.3.4	Estudo da transferência de calor por convecção	30
	Ar	32
	Água	33
	Etanol	34
3.3.5	Estudo de custos	35
3.4	Resultado do processo de dimensionamento	37
4	Ensaio do aquecedor	<b>40</b>
4.1	Calibração do medidor de vazão	40
4.2	Ensaio com água	41
4.3	Ensaio preliminares com C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (etanol)	41
4.4	Ensaio finais com C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (etanol)	42
5	Conclusões e perspectivas	<b>44</b>
A	Propriedades termofísicas dos fluidos utilizados	<b>47</b>

A.1	Propriedades termofísicas do ar	47
A.2	Propriedades termofísicas da água	48
A.3	Propriedades termofísicas do etanol	49
A.4	Outras propriedades	49

## Lista de figuras

1.1	Objetivos específicos do trabalho.	11
2.1	Representação do volume de controle no balanço de energia.	12
2.2	Passagem do fluido através dos espaços vazios. Adaptado de [9].	16
2.3	Possíveis soluções para aquecimento de etanol a baixas vazões.	17
2.4	Parâmetros fixos e variáveis para os cálculos.	20
2.5	Esquema utilizado no cálculo.	21
3.1	Opções para vaporização do etanol.	22
3.2	Parâmetros geométricos.	26
3.3	Configurações geométricas para um tubo de $D = 0,25\text{ m}$ e $L = 15\text{ cm}$	26
3.4	Parâmetros adimensionais.	27
3.5	Números adimensionais para o ar, para um tubo de $D = 0,25\text{ m}$ e $L = 15\text{ cm}$ .	28
3.6	Números adimensionais para a água, para um tubo de $D = 0,25\text{ m}$ e $L = 15\text{ cm}$ .	29
3.7	Números adimensionais para o etanol, para um tubo de $D = 0,25\text{ m}$ e $L = 15\text{ cm}$ .	30
3.8	Parâmetros térmicos.	31
3.9	Parâmetros de transferência de calor para o ar, para um tubo de $D = 0,25\text{ m}$ e $L = 15\text{ cm}$ .	32
3.10	Parâmetros de transferência de calor para a água, para um tubo de $D = 0,25\text{ m}$ e $L = 15\text{ cm}$ .	33
3.11	Parâmetros de transferência de calor para o etanol, para um tubo de $D = 0,25\text{ m}$ e $L = 15\text{ cm}$ .	34
3.12	Curva de custos para bilhas de aço.	35
3.13	Custo total para bilhas de aço.	36
3.14	Comparação entre bilhas de aço e miçangas de latão para preenchimento do leito.	37
3.15	Representação do leito recheado. Adaptado de [10].	38
3.16	Esquema da instalação experimental.	38
3.17	Esquema da instalação experimental original ( $D = 25,4\text{ mm}$ e $L = 15\text{ cm}$ ).	39
4.1	Curva de calibração do medidor de vazão.	41
4.2	Esquema da instalação experimental modificada ( $D = 9\text{ mm}$ e $L = 40\text{ cm}$ ).	42
4.3	Combustão do etanol ( $D = 9\text{ mm}$ e $L = 40\text{ cm}$ ).	43

## Lista de tabelas

3.1	Especificações para os tubos com resistência.	23
3.2	Especificações para os tubos com leitões recheados.	25
3.3	Estudo de custos para bilhas de aço.	35
4.1	Vazões indicadas e reais para gerar a curva de calibração.	40
4.2	Ensaio com etanol.	42
A.1	Propriedades do ar.	47
A.2	Propriedades da água.	48
A.3	Propriedades do etanol.	49
A.4	Outras propriedades.	49



# 1

## Introdução

### 1.1

#### Introdução geral

A combustão é usada há milhares de anos pela humanidade como forma de obtenção de energia. A necessidade de reduzir o consumo do petróleo, a busca por fontes renováveis de energia e o aumento da emissão de poluentes na atmosfera fizeram o estudo da combustão uma área de pesquisa em grande crescimento.

Segundo dados da *International Energy Agency (IEA)*, há uma redução de quase 90% na emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa ao utilizar o etanol (extraído da cana-de-açúcar) ao invés da gasolina. [1]

Além dessa redução, o etanol diminui a emissão de gases prejudiciais a saúde humana, que formam o ozônio ( $O_3$ ) e monóxido de carbono (CO), responsáveis por problemas respiratórios, envelhecimento precoce e irritações nos olhos. Tanto a gasolina quanto o diesel emitem na atmosfera compostos como benzeno ( $C_6H_6$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), substâncias cancerígenas e responsáveis por danos pulmonares.

Apesar da composição química favorecer o etanol, a tecnologia empregada no projeto do veículo é um fator decisivo para a poluição. Porém, estima-se que em quarenta anos, todas as reservas conhecidas de petróleo estarão extintas [2]. Mesmo surgindo novas fontes, um dia o petróleo irá se esgotar. Já o etanol, por ser um combustível renovável, depende apenas da agricultura para o plantio dos insumos.

Além disso, o etanol também contribui para a bioeletricidade, gerando outras fontes de energia. Dados da *Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB)* mostram que a safra de 2009/2010 de cana-de-açúcar produziu 20.000 MWh (megawatts hora) de eletricidade, capaz de abastecer 28 milhões de residências [3]. Entretanto, ainda existe um alto custo para tal produção, podendo ser diminuído por mais incentivos governamentais.

O Brasil se destaca no cenário global sendo o maior produtor de cana-

de-açúcar e é o único país onde o uso do álcool é superior que o da gasolina [4].

Em relação ao desempenho do motor, a combustão do etanol possui maior resistência a auto-detonação comparado a gasolina [5]. Outra vantagem [6] seria que por possuir uma massa específica maior do que a gasolina, o etanol fica mais comprimido no motor, causando um aumento de potência. Em geral, esse aumento de potência pode chegar a quase 10%. Em relação ao rendimento por quilometragem, o etanol rende 70% da gasolina, sendo mais econômico utilizar quando o seu preço está pelo menos 30% mais barato que a gasolina.

## 1.2

### Introdução específica

O laboratório de combustão e turbulência do departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio está recentemente focado no estudo de biocombustíveis. Este presente trabalho tem como foco o projeto de um pré-vaporizador de uma mistura etanol-ar.

O problema será resolvido através de estudos e dimensionamentos de dois possíveis sistemas de aquecimento, determinando qual terá um melhor desempenho na troca de calor. É um problema interessante porque leva à economia da importação de petróleo, no uso do bagaço de cana para gerar energia [6], utiliza-se uma fonte de combustível renovável (etanol) e engloba um estudo sobre leitos recheados.

## 1.3

### Objetivos

Este trabalho tem como objetivo projetar, construir e ensaiar um vaporizador de etanol. Esse vaporizador tem por finalidade alimentar um experimento de combustão pré-misturada de etanol e ar em regime turbulento.

O projeto levará em conta diferentes possibilidades de sistemas de aquecimento (por ebulição e leito fixo - *fixed beds*) para determinar aquela mais econômica e compacta.

Esse sistema será construído e ensaiado a fim de garantir o fornecimento estável de etanol vaporizado numa ampla faixa de vazões.

Os objetivos específicos podem ser visualizados na Figura 1.1:



Figura 1.1: Objetivos específicos do trabalho.

### 1.3.1

#### Organização do trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

No primeiro capítulo, introduções gerais e específicas: como o problema está sendo resolvido e a sua importância. Além de exibir os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo possui a formulação matemática, levando em conta o balanço geral de energia, o estudo da ebulição, leitos recheados e sua geometria. É exibido também um fluxograma das variáveis no Matlab.

O terceiro capítulo exibe o dimensionamento e especificações do aquecedor, além do estudo da transferência de calor utilizando leitos recheados e todo o resultado do processo, incluindo o estudo de custos.

O quarto capítulo engloba os ensaios com o aquecedor, utilizando água e etanol, e também a calibração do medidor de vazão.

O quinto e último capítulo exibe as conclusões e perspectivas do trabalho.

## 2

### Formulação matemática do problema

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e as metodologias utilizadas no presente trabalho.

#### 2.1

##### Balanco global de energia

Em um tubo, onde o escoamento é restrito, o balanço de energia pode determinar como a temperatura média varia ao longo do mesmo e como a transferência de calor por convecção se relaciona com as diferenças entre as temperatura na entrada e saída do tubo.

O fluido escoa com uma vazão mássica  $\dot{m}$  constante e a transferência de calor ocorre na superfície interna. Todo o equacionamento desta seção foi obtido a partir de [7].

Essa vazão mássica pode ser representada por:

$$\dot{m} = \rho V A_{tr}, \quad (2-1)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $V$  a velocidade e  $A_{tr}$  a área da seção transversal onde o fluido escoa.

Algumas hipóteses simplificadoras foram consideradas:

- Fluido incompressível (densidade constante);
- Gás ideal com variação de pressão negligenciável;
- Propriedades uniformes nas seções;
- Sem perdas por atrito;
- Troca de calor por condução na direção axial negligenciável.

A Figura 2.1 representa o volume de controle utilizado no problema:

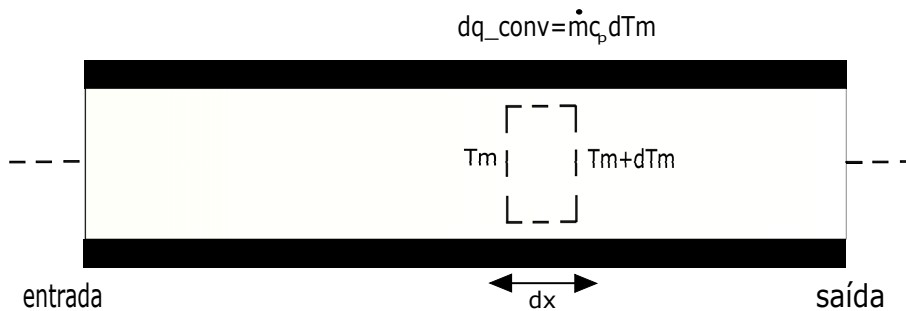


Figura 2.1: Representação do volume de controle no balanço de energia.

Com isso, temos uma expressão geral da taxa de calor que se aplica independente da natureza do escoamento e da superfície do tubo:

$$q_{conv} = \dot{m} c_p (T_{m,sai} - T_{m,ent}), \quad (2-2)$$

sendo  $c_p$  o calor específico.

A equação pode ser moldada para representar a taxa de transferência de calor por convecção de modo diferencial:

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p dT_m. \quad (2-3)$$

Considerando  $P = \pi D$  o perímetro da superfície e substituindo na equação da próxima seção, a Eq. 2-6, temos:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q'' x P}{\dot{m} c_p} = \frac{P}{\dot{m} c_p} h (T_s - T_m). \quad (2-4)$$

Podemos concluir a partir da Eq. (2-4) que mesmo que  $T_s$  possa ser uma constante,  $T_m$  deve sempre variar com  $x$ , exceto no caso em que não ocorra transferência de calor ( $T_s = T_m$ ).

## 2.2

### Transferência e propagação de calor

A transferência de calor é a troca de energia devido a uma diferença de temperatura. Sempre que houver diferença de temperatura entre meios, há necessariamente, transferência de calor.

A transferência e propagação de calor ocorre de três maneiras: condução, convecção e radiação.

#### 2.2.1

##### Condução

A condução está relacionada com atividades a níveis atômicos e moleculares.

Temperaturas mais altas tem energias moleculares mais altas, fazendo com que ocorra muito movimento e choque entre as moléculas vizinhas.

Com o choque, uma alta energia é transferida das moléculas mais energéticas para as com menos energia. A transferência de energia térmica é sempre no sentido de uniformizar a temperatura.

A condução é a transferência de calor a nível molecular através de um corpo. Segue a lei de Fourier:

$$q_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L}. \quad (2-5)$$

Essa equação fornece o fluxo térmico por condução. Onde  $L$  é a largura do corpo sólido,  $T_1$  e  $T_2$  são as diferenças de temperatura e  $k$  é a condutividade térmica do material.

### 2.2.2

#### Convecção

A transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos: movimento molecular (difusão, que ocorre na condução a nível molecular) e a transferência de energia através do movimento global (macroscópico). [7]

A transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície e um fluido. Segue a lei do resfriamento de Newton:

$$q'' = h(T_s - T_\infty), \quad (2-6)$$

onde  $T_s$  é a temperatura superficial,  $T_\infty$  é a temperatura do fluido e  $h$  é o coeficiente de troca de calor por convecção.

A equação 2-6 já considera os efeitos de condução.

### 2.3

#### Ebulição

Para a obtenção do gráfico comprimento aquecido do tubo *vs* coeficiente de troca de calor por convecção  $h$ , ( $x \times h$ ), a fim de analisar em que posição  $x$  ao longo do tubo temos um maior valor para  $h$ , foram necessárias as formulações a seguir, baseadas na referência [7].

O fluxo térmico  $q''$  pode ser calculado pela seguinte equação:

$$q'' = \frac{q}{\pi D L_a}, \quad (2-7)$$

onde  $q$  é a taxa de calor,  $D$  é o diâmetro do tubo e  $L_a$  o comprimento aquecido do tubo.

Sendo  $\bar{X}$  a fração de vapor média, tem-se:

$$\bar{X}(x) = \frac{q'' \pi D x}{\dot{m} h_{fg}}, \quad (2-8)$$

onde  $x$  é uma função do comprimento e  $h_{fg}$  é a entalpia de vaporização do fluido.

Dado o número de Froude para a fase líquida:

$$Fr = \frac{\left(\frac{\dot{m}''}{\rho_l}\right)^2}{gD}, \quad (2-9)$$

onde  $g$  é a gravidade,  $\rho_l$  a densidade do fluido no estado líquido e  $\dot{m}''$  é a vazão mássica por unidade de área que pode ser representada por:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{m}}{A_{tr}}, \quad (2-10)$$

sendo  $A_{tr}$  a área da seção transversal do tubo, calculada por  $\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$ .

Para tubos horizontais com  $Fr \leq 0,04$ , o parâmetro de estratificação  $f(Fr)$  pode ser calculado por:

$$f(Fr) = 2,63 Fr^{0,3}. \quad (2-11)$$

O número de Nusselt, que é a razão entre as transferências de calor por convecção e somente por condução,  $Nu_D$ , pode ser calculado através da seguinte relação:

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}. \quad (2-12)$$

Existe uma correlação entre o número de Nusselt e  $h_{mf}$ : (o  $h$  da equação (2-13) torna-se  $h_{mf}$  no caso das propriedades da equação (2-12) serem avaliadas na temperatura de saturação)

$$Nu_D = \frac{h D_h}{k}, \quad (2-13)$$

sendo  $D_h$  o diâmetro hidráulico e  $k$  a condutividade térmica, dada em  $W/(mK)$ .

Todas as propriedades são avaliadas na temperatura de ebulição,  $T_{sat}$ . O coeficiente convectivo monofásico,  $h_{mf}$  está associado à região de convecção forçada no líquido e pode ser obtido usando a equação (2-12), também com as propriedades avaliadas em  $T_{sat}$ . [7]

É válido mencionar que em regimes laminares, temos as seguintes constantes:

$$Nu_D = 4,36, \quad (2-14)$$

$$f Re = 64, \quad (2-15)$$

sendo  $f$  o fator de atrito, um parâmetro adimensional responsável por quantificar a perda de carga ocorrida em um escoamento devido ao atrito, onde na região turbulenta pode ser determinado através do Diagrama de Moody. Em casos laminares, o produto é uma constante, como visto na equação (2-15).

As correlações a seguir foram desenvolvidas para tubos circulares lisos na região de ebulição com escoamento saturado e regime turbulento ( $Re > 2300$ ). [7]

$$\frac{h}{h_{mf}} = 0,6683 \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,1} \bar{X}^{0,16} (1-\bar{X})^{0,64} f(Fr) + 1058 \left( \frac{q''}{\dot{m}'' h_{fg}} \right)^{0,7} (1-\bar{X})^{0,8} G_{s,f}. \quad (2-16)$$

Ou, para  $0 < \bar{X} \leq 0,8$ :

$$\frac{h}{h_{mf}} = 1,136 \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,45} \bar{X}^{0,72} (1-\bar{X})^{0,08} f(Fr) + 667,2 \left( \frac{q''}{\dot{m}'' h_{fg}} \right)^{0,7} (1-\bar{X})^{0,8} G_{s,f}. \quad (2-17)$$

As equações (2-16) e (2-17) são aplicáveis quando as dimensões do canal são grandes em relação ao diâmetro a bolha formada, ou seja, para números de confinamento ( $Co$ ) menores ou igual a 0.5: [7]

$$Co = \sqrt{\sigma / (g[\rho_l - \rho_v])} / D_h \leq 0,5. \quad (2-18)$$

Esta solução foi abandonada em prol daquela que consiste em empregar a metodologia dos leitos recheados.

## 2.4

### Leitos recheados

A solução proposta para conseguir realizar a troca de calor sem vaporizar o etanol foi com a utilização de bilhas, através da metodologia dos leitos recheados, onde uma grande área superficial pode ser obtida para a troca de calor, devido ao escoamento irregular que existe nos espaços vazios (figura 2.2).

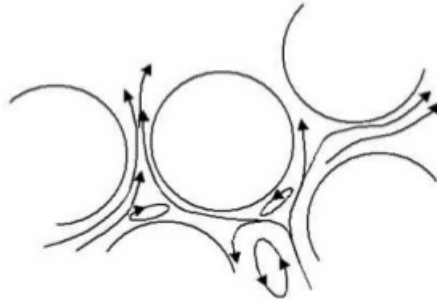


Figura 2.2: Passagem do fluido através dos espaços vazios. Adaptado de [9].

A principal vantagem em utilizar leitos recheados é que os cálculos são feitos em função do diâmetro da esfera, e não em função do diâmetro do tubo.



Com isso, obtemos maiores números de Reynolds e Nusselt e um maior coeficiente de troca de calor por convecção. Todas essas relações possibilitam troca de calor mais efetiva entre o material e o fluido, como podemos ver no esquema da figur 2.3.

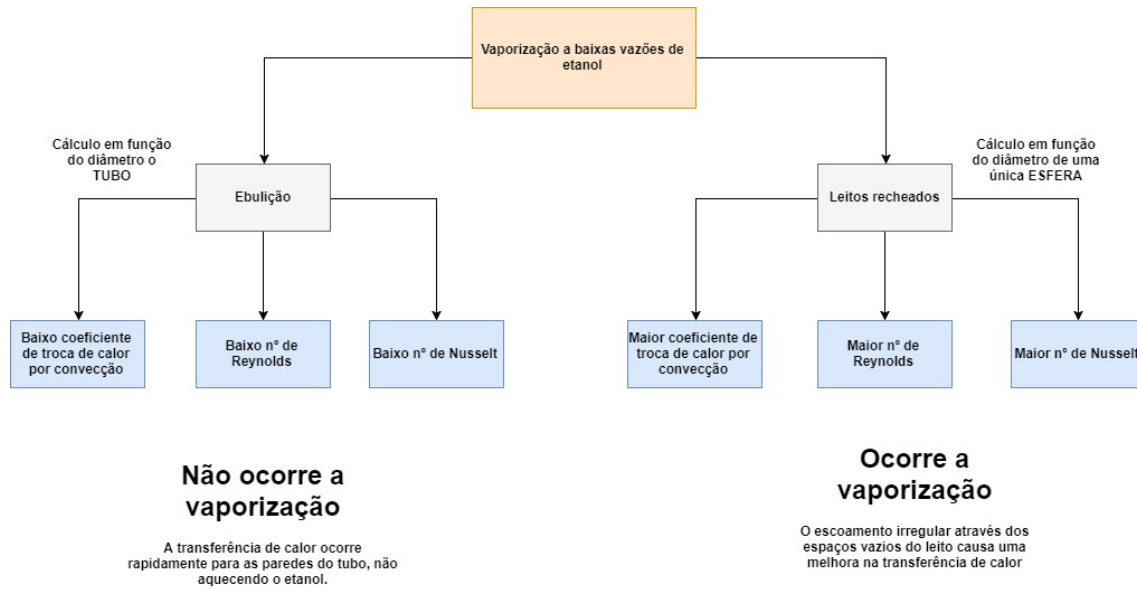


Figura 2.3: Possíveis soluções para aquecimento de etanol a baixas vazões.

As possíveis configurações dos parâmetros envolvem a quantidade de bilhas necessária e seu diâmetro.

Para os cálculos necessários ao dimensionamento, foram pré-determinadas algumas propriedades, tais como: vazão mássica, temperatura de entrada e saída no tubo, comprimento (aquecido) e diâmetro do leito.

Um dos principais objetivos dos cálculos é determinar uma quantidade ideal de bilhas que forneça uma troca de calor satisfatória. Para isso, foi necessário analisar diferentes valores dos coeficientes de troca de calor de algumas bibliografias:

A relação de Whitaker [8] correlaciona a transferência de calor para gases com diferentes geometrias a serem utilizadas nos leitos (esferas, cilindros, dentre outros tipos). É válida nas condições:  $20 < Re_{D_p} < 1000$  e  $0,34 < \epsilon < 0,78$

$$\frac{\bar{h} D_p}{k} = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} (0,5 Re_{D_p}^{0,5} + 0,2 Re_{D_p}^{2/3}) Pr^{1/3}. \quad (2-19)$$

A relação de Upadhyay [8] utiliza a analogia de transferência de massa para o estudo de transferência de calor e massa para baixos números de Reynolds. É válida na condição:  $0,01 < Re_{D_p} < 10$

$$\frac{\bar{h}}{c_p \rho U} Pr^{2/3} = \frac{1}{\epsilon} 1,075 Re_{D_p}^{-0.826}. \quad (2-20)$$

A relação de Beek [8] é válida para transferência de calor da parede de um leito recheado (partículas esféricas) para um gás. É válida na condição:  $40 < Re_{D_p} < 2000$

$$\frac{\bar{h} D_p}{k} = 0,203 Re_{D_p}^{1/3} Pr^{1/3} + 0,220 Re_{D_p}^{0.8} Pr^{0.4}. \quad (2-21)$$

Da relação da bibliografia de Incropera [7], temos:

$$St = \frac{h}{\rho U c_p} = \frac{Nu}{Re Pr}, \quad (2-22)$$

$$\frac{C_f}{2} = St Pr^{2/3} = j_c, \quad (2-23)$$

$$\epsilon j_c = 2,06 Re_D^{-0.575}, \quad (2-24)$$

onde a equação (2-24) tem como restrições:  $Pr \cong 0,7$ ,  $0,30 < \epsilon < 0,50$  e  $90 < Re_D < 4000$

Combinando as Eqs. (2-22), (2-23) e (2-24), podemos obter o coeficiente de convecção:

$$h = 2,06 Re_D^{-0.575} \rho U c_p Pr^{-(2/3)} \epsilon^{-1}, \quad (2-25)$$

onde o número de Reynolds, que é a razão entre as forças de inércia e viscosas, pode ser definido por:

$$Re = \frac{\rho U D_p}{\mu}, \quad (2-26)$$

e o número de Nusselt é definido por:

$$Nu = \frac{h D_p}{k}. \quad (2-27)$$

Todas as propriedades acima são avaliadas na temperatura média aritmética do fluido na entrada e saída do tubo.

A taxa de transferência de calor para o leito pode ser calculada por:

$$q = \bar{h} A_{p,t} \Delta T_{ml}, \quad (2-28)$$

onde  $A_{p,t}$  é a área total das esferas e  $\Delta T_{ml}$  é a média logarítmica das temperaturas, sendo calculada por [7]:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_s - T_{in}) - (T_s - T_{out})}{\ln \frac{T_s - T_{in}}{T_s - T_{out}}}. \quad (2-29)$$

Temos também a seguinte relação:

$$\frac{T_s - T_{out}}{T_s - T_{in}} = \exp \left( - \frac{\bar{h} A_{p,t}}{\rho U A_{transv} c_p} \right), \quad (2-30)$$

para a Eq. ((2-30)), a velocidade  $U$  é analisada na entrada do tubo e  $A_{transv}$  é a área da seção transversal do leito.

$D_p$  é o diâmetro de uma única bilha (esfera) e  $U$  é a velocidade que o escoamento teria se não houvesse esferas.

A fração de vazio  $\epsilon$  (ou porosidade) pode ser definida como (1 - fração de volume ocupado pelas bilhas).

Procedimento de cálculo: para cada coeficiente de troca de calor, foi calculado o valor de  $T_s$  a partir da Eq. ((2-30)), e com isso calculado o  $\Delta T_{ml}$  pela Eq. ((2-29)), e então pode-se calcular a taxa de transferência de calor.

Tem-se as relações para calcular o fator de atrito  $f$  e a perda de carga [8]:

$$f = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \left( 1,75 + 150 \frac{1 - \epsilon}{Re} \right), \quad (2-31)$$

e

$$perda = f \frac{L_{tubo}}{D_p} \frac{U^2}{2}. \quad (2-32)$$

## 2.5

### Cálculos geométricos

Os parâmetros geométricos (quantidade de fileiras/por seção/total de bilhas necessárias e porosidades) foram feitos a partir dos equacionamentos a seguir.

As quantidades de fileiras e bilhas podem ser calculadas através das Eqs. (2-33) e (2-34), respectivamente.

$$fileiras = \frac{L}{D} \quad (2-33)$$

$$qtde\_bilhas = \frac{D}{D_p} \times fileiras \quad (2-34)$$

Já a quantidade de bilhas em uma seção transversal pode ser calculada pelas Eqs. (2-35) e (2-36), respectivamente.

$$\theta = 2 \sin^{-1} \left( \frac{D_p}{D - D_p} \right) \quad (2-35)$$

$$qtde\_secao = \frac{2\pi}{\theta} \quad (2-36)$$

E por fim, a porosidade:

$$porosidade = 1 - \left( qtde\_secao \times \frac{2}{3} \times \frac{D_p^2}{D^2} \right) [7] \quad (2-37)$$

Onde  $D_p$  é o diâmetro das esferas,  $D$  o diâmetro do tubo e  $L$  o comprimento do tubo.

## 2.6

### Esquematização do cálculo do dimensionamento

Para obter a solução numérica pelo Matlab, foi utilizada da seguinte metodologia:

Foram definidos primeiramente quais seriam os parâmetros fixos e os variáveis do problema, como podemos ver na Fig. 2.4.



Figura 2.4: Parâmetros fixos e variáveis para os cálculos.

Após dimensionar os parâmetros geométricos, o cálculo estequiométrico da vazão mássica e determinação das temperaturas de entrada e saída, os cálculos finalmente podem ser realizados, como segue a Fig. 2.5.

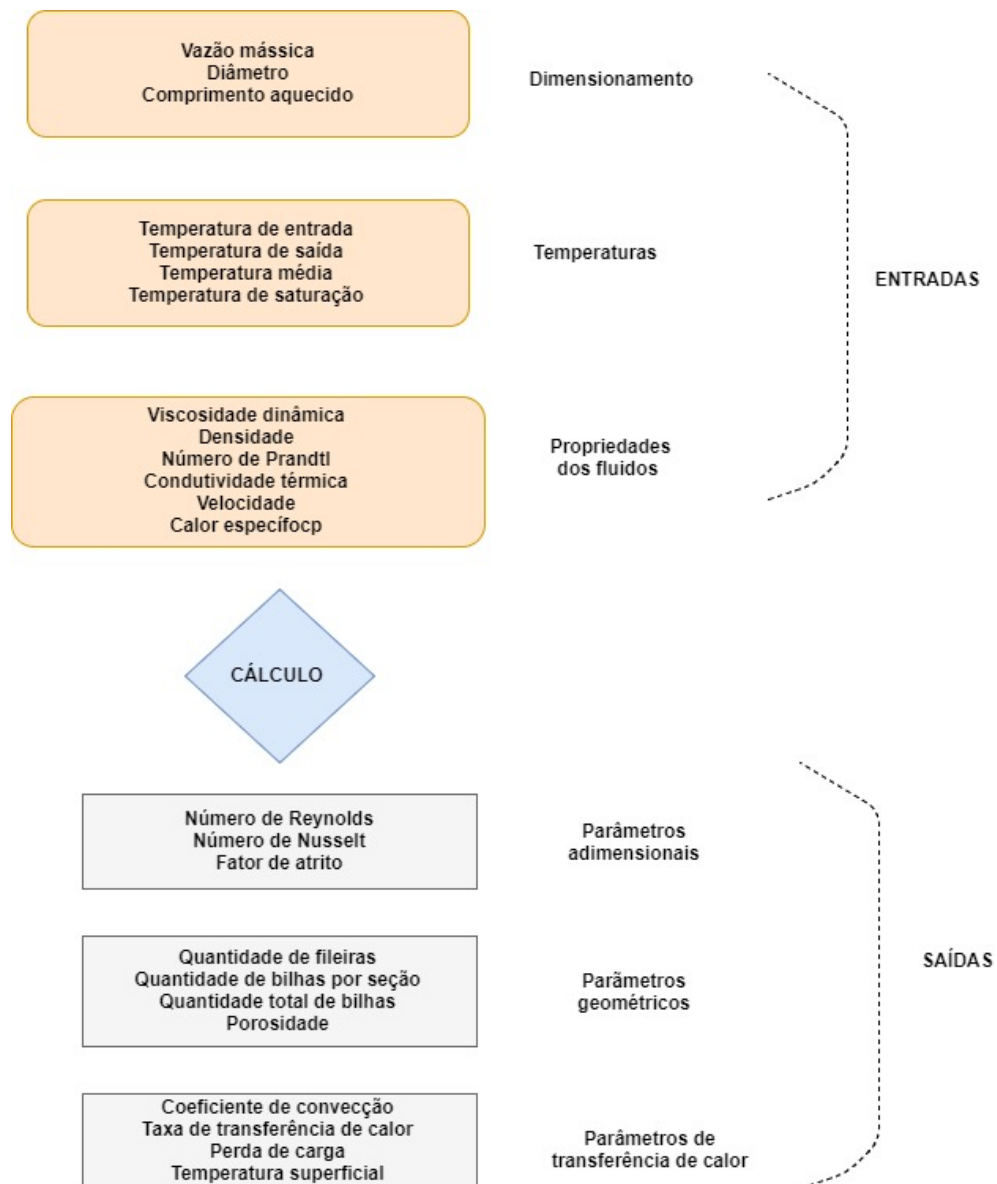


Figura 2.5: Esquema utilizado no cálculo.

### 3

## Dimensionamento do aquecedor

Este capítulo exibe todo o processo de dimensionamento do aquecedor, tanto considerando somente o processo de ebulição quanto utilizando leitos recheados. São exibidos também as análises numéricas feitas no *Matlab*, os critérios de escolha, e por fim, a geometria utilizada e suas dimensões.

### 3.1

#### Possíveis soluções para aquecimento de baixas vazões de etanol

A vaporização do etanol pode ocorrer por ebulição "tradicional" ou preenchendo o interior do tubo com esferas (leitos recheados - "*fixed beds*"), como mostra a Figura 3.1.

Será determinada qual alternativa garante uma troca de calor satisfatória - que consiga vaporizar o etanol - para o experimento.

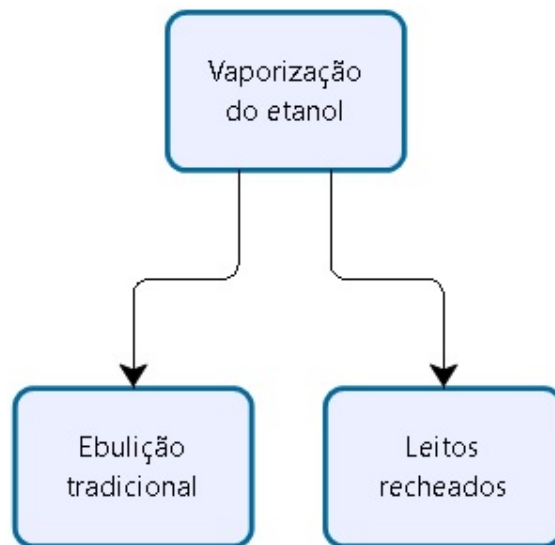


Figura 3.1: Opções para vaporização do etanol.

Dependendo dos resultados numéricos, será escolhida a melhor opção para realizar o procedimento.

### 3.2

#### Estudo da transferência de calor por ebulição em um tubo

Nesta seção, serão apresentados os dimensionamentos e seus resultados para escoamentos de água, ar e etanol em tubos lisos aquecidos por fitas de resistências elétricas.

#### 3.2.1

##### Especificações do sistema de aquecimento

Para o sistema de aquecimento usando resistências elétricas, temos as especificações listadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificações para os tubos com resistência.

Comprimento aquecido do tubo	$L$	$1 < x < 2$	$m$
Diâmetro do tubo	$D$	$1/4'' < x < 1/8''$	$pol$
Vazão mássica	$\dot{m}$	$0.08225 \times 10^{-3}$	$kg/s$
Temperatura de entrada do fluido	$T_{in}$	293	$K$
Temperatura de saída do fluido	$T_{out}$	353	$K$
Temperatura média	$T_{med}$	323	$K$
Temperatura de saturação do etanol	$T_{sat}$	351	$K$

Os parâmetros geométricos (diâmetro e comprimento do tubo) foram escolhidos de acordo com a disponibilidade no laboratório, e as temperaturas foram determinadas arbitrariamente para um primeiro estudo, possibilitando a análise de como o sistema se comporta com a variação das mesmas, a fim de escolher a melhor alternativa que forneça uma vaporização completa do etanol.

#### 3.2.2

##### Estudo geométrico do comprimento aquecido

Considerando uma fita térmica de  $L = 1\text{ m}$  de comprimento, será determinado, a critério de projeto, o melhor diâmetro para o tubo ( $D = 1/4''$  ou  $D = 1/8''$  disponíveis) e o fornecimento de calor mais viável ao sistema ( $q = 100\text{ W}$  ou  $q = 400\text{ W}$  disponíveis).

Para estimar experimentalmente o comprimento aquecido ( $L_a$ ) do tubo, foi realizada uma maquete de fita com  $2\text{ cm}$  de altura e  $1\text{ m}$  de comprimento (simulando a fita térmica), enrolada em formato helicoidal em um tubo. Com isso, foi medido o comprimento aquecido do tubo. Após a análise experimental, foi feita a análise matemática, para comprovar as estimativas para os

diâmetros  $D = 1/4''$  e  $D = 1/8''$ .

Para um  $D = 0,0082\text{ m}$ , foi obtido um comprimento aquecido  $L_a = 0,77\text{ m}$  (experimentalmente). Em termos de cálculos, tem-se  $C = 2\pi \cdot \frac{D}{2}$

Usando  $D = 0,0082\text{ m}$ , o comprimento da fita para uma volta no tubo foi  $C = 0,002576\text{ m}$ .

Como a fita tem  $1\text{ m}$ , temos 38,81 voltas da fita. E como cada volta tem  $2\text{ cm}$ , o comprimento aquecido calculado foi  $L_a = 0,7762\text{ m}$ .

Com esse mesmo raciocínio, foram calculados os comprimentos aquecidos em função dos diferentes diâmetros:

$$L_a(D = 1/4'') = 1,0025\text{ m}$$

$$L_a(D = 1/8'') = 2,0051\text{ m}$$

### 3.3

#### Estudo da transferência de calor por leitos recheados

Nesta seção, serão apresentados os dimensionamentos e seus resultados para escoamentos de água, ar e etanol em tubos com leitos recheados por bilhas esféricas.

Em algumas legendas dos gráficos aparecerão as abreviações: "I-7.81"; "K-7.24"; "K-7.20" e "K-7.21", que fazem referência às diferentes metodologias de cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção presentes nas literaturas mostradas nas Eqs. (2-25), (2-21), (2-19) e (2-20), respectivamente.

#### 3.3.1

##### Especificações do sistema de aquecimento

Para os tubos com leitos recheados, foram utilizados as seguintes especificações (as propriedades termofísicas do ar, água e etanol encontram-se no apêndice):



Tabela 3.2: Especificações para os tubos com leitos recheados.

Comprimento aquecido do tubo	$L$	$15 \times 10^{-2}$	$m$
Diâmetro do tubo	$D$	0.0254	$m$
Diâmetro das bilhas	$d$	$0.001 < x < 0.010$	$m$
Vazão mássica	$\dot{m}$	$0.08225 \times 10^{-3}$	$kg/s$
Temperatura de entrada do fluido	$T_{in}$	293	$K$
Temperatura de saída do fluido	$T_{out}$	353	$K$
Temperatura média	$T_{med}$	323	$K$
Temperatura de saturação do etanol	$T_{sat}$	351	$K$

Para critério de projeto, foram feitos cálculos considerando o diâmetro das bilhas variando entre  $1\text{ mm}$  e  $10\text{ mm}$ .

A vazão mássica foi calculada estequiometricamente, e foi utilizado seu maior valor.

Os parâmetros geométricos (diâmetro e comprimento do tubo) foram escolhidos de acordo com a disponibilidade no laboratório, e as temperaturas foram determinadas arbitrariamente para um primeiro estudo, possibilitando a análise de como o sistema se comporta com a variação das mesmas, a fim de escolher a melhor alternativa que forneça uma vaporização completa do etanol.

### 3.3.2

#### Estudo da configuração geométrica

Nesta seção serão estudadas as configurações geométricas para o ar, etanol e água, os fluidos utilizados no estudo. Tais configurações estão relacionadas com a quantidade de bilhas por seção transversal, número de fileiras, quantidade total de bilhas e a porosidade (ou fração de vazio).

Os resultados são fundamentais para a escolha da configuração das bilhas, isto é, como o seu diâmetro e sua quantidade.

A figura 3.2 exhibe os parâmetros geométricos que serão estudados nesta seção.

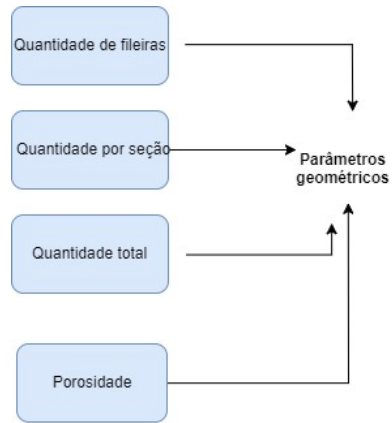
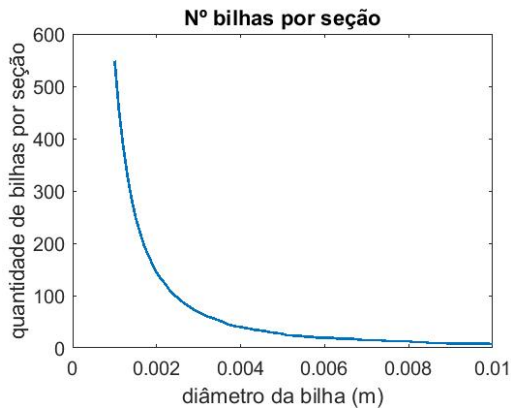
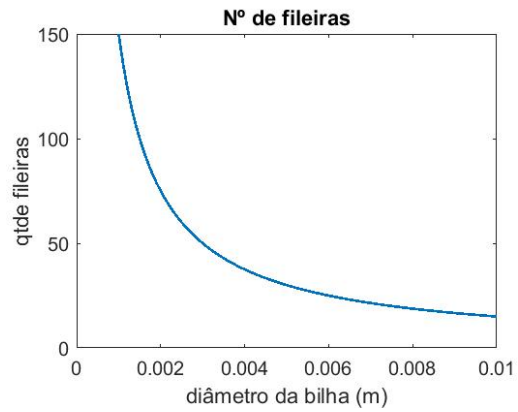


Figura 3.2: Parâmetros geométricos.

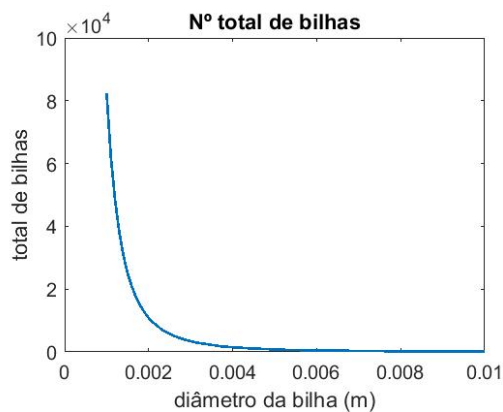
A figura 3.3 exibe os resultados dos cálculos dos números de bilhas por seção, fileiras, total de bilhas e porosidade.



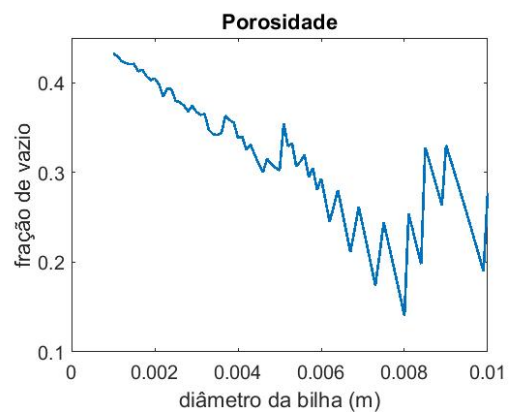
3.3(a): quantidade de bilhas por seção em função do diâmetro das bilhas.



3.3(b): quantidade de fileiras em função do diâmetro das bilhas.



3.3(c): total de bilhas em função do diâmetro das bilhas.



3.3(d): porosidade em função do diâmetro das bilhas.

Figura 3.3: Configurações geométricas para um tubo de  $D = 0,25$  m e  $L = 15$  cm

Podemos observar a partir das configurações geométricas que a quantidade de esferas por seção e o número de fileiras diminuem ao aumentar-se o diâmetro. Logo, a quantidade total de esferas diminui.

Quando  $D_p$  é da mesma ordem de grandeza que  $D$ , pequenas variações de  $D_p$  podem levar à uma importante variação percentual do número de bilhas e consequentemente da fração de vazio.

É necessário fazer um estudo para determinar qual o melhor diâmetro para a esfera, levando em conta os números adimensionais, os parâmetros relacionados à transferência de calor, e claro, o estudo dos custos, porque quanto menores os diâmetros das bilhas, aumentam-se a quantidade necessária, e com isso, o custo do projeto.

### 3.3.3

#### Estudo dos números adimensionais

Nesta seção serão estudados os números adimensionais, responsáveis pelas características do escoamento. São eles: número de Reynolds, número de Nusselt e fator de atrito, como podemos ver no esquema da figura 3.4.

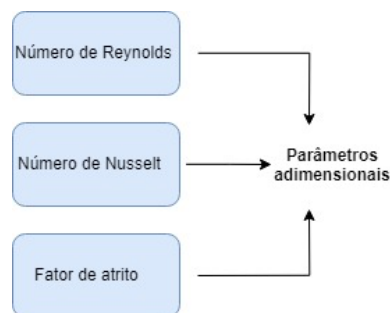
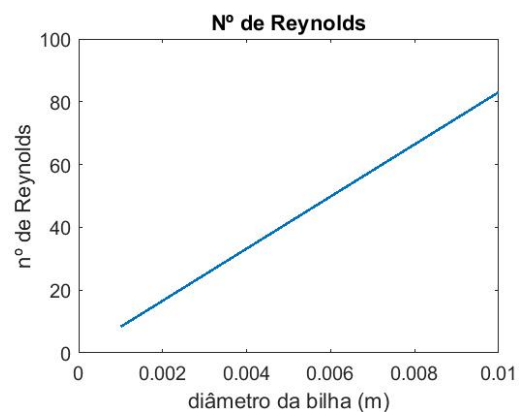
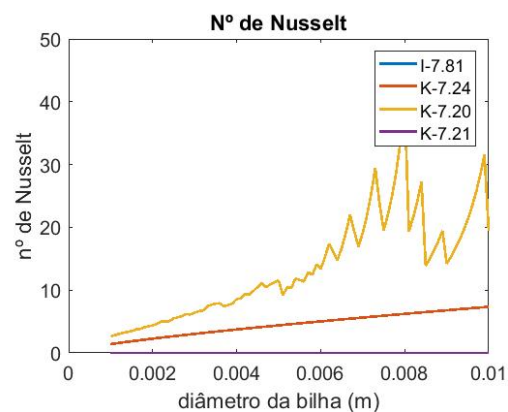


Figura 3.4: Parâmetros adimensionais.

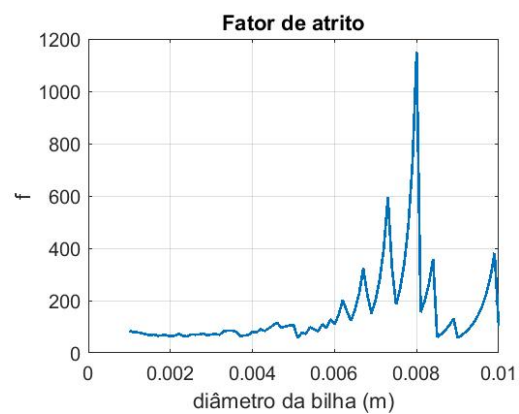
As figuras 3.5, 3.6 e 3.7 exibem os resultados dos cálculos dos números de Reynolds, Nusselt e fator de atrito para o ar, água e etanol, respectivamente.

**Ar**

3.5(a): número de Reynolds em função do diâmetro das bilhas.



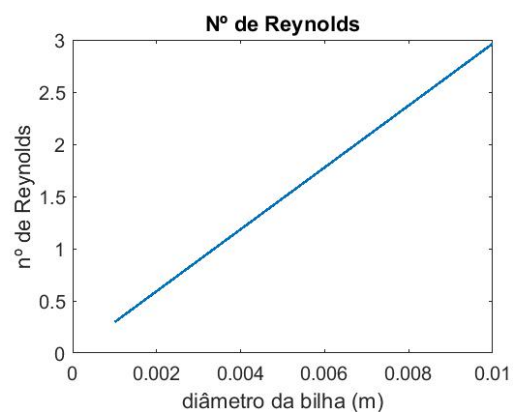
3.5(b): número de Nusselt em função do diâmetro das bilhas.



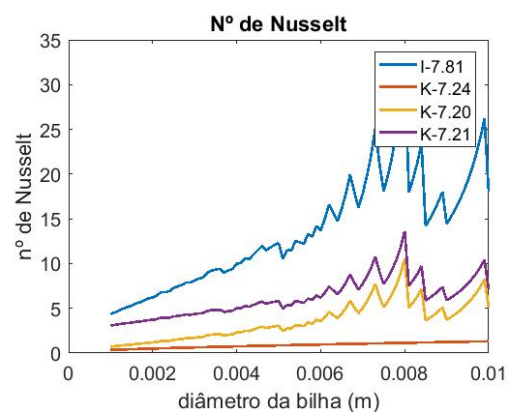
3.5(c): fator de atrito em função do diâmetro das bilhas.

Figura 3.5: Números adimensionais para o ar, para um tubo de  $D = 0,25$  m e  $L = 15$  cm.

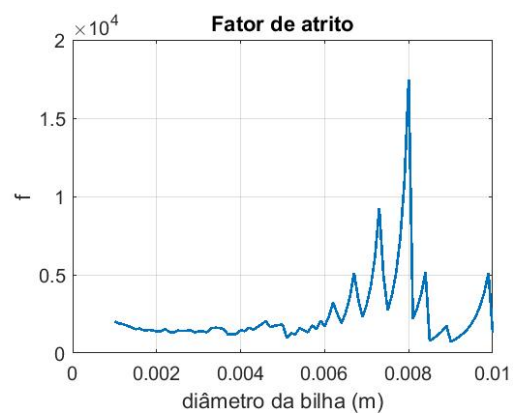
## Água



3.6(a): número de Reynolds em função do diâmetro das bilhas.



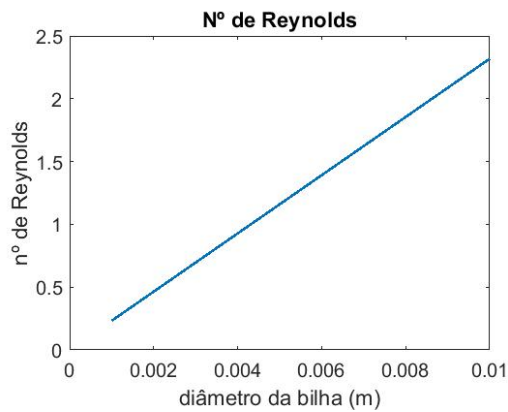
3.6(b): número de Nusselt em função do diâmetro das bilhas.



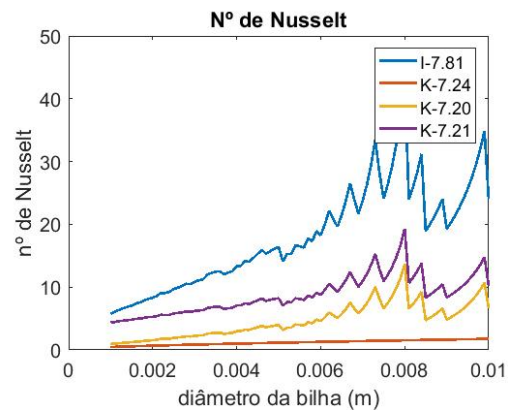
3.6(c): fator de atrito em função do diâmetro das bilhas.

Figura 3.6: Números adimensionais para a água, para um tubo de  $D = 0,25$  m e  $L = 15$  cm.

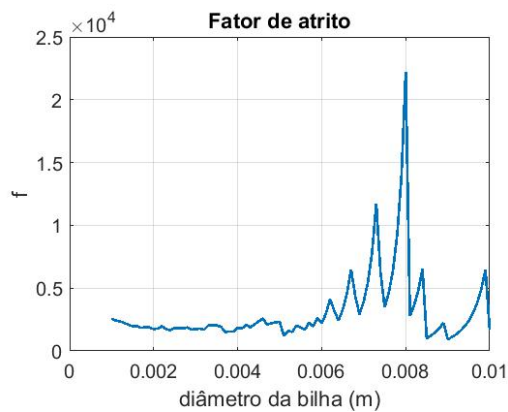
## Etanol



3.7(a): número de Reynolds em função do diâmetro das bilhas.



3.7(b): número de Nusselt em função do diâmetro das bilhas.



3.7(c): fator de atrito em função do diâmetro das bilhas.

Figura 3.7: Números adimensionais para o etanol, para um tubo de  $D = 0,25$  m e  $L = 15$  cm.

O número de Reynolds varia entre  $20 - 80$  para o escoamento de ar e entre  $0,5 - 2,5$  para os líquidos. Para esferas entre  $6,5 - 8,5$  mm, obtemos um crescimento maior do fator de atrito e do número de Nusselt.

Em relação ao número de Nusselt, temos uma ampla faixa de operação, isto é, entre  $3 - 30$  para o ar e entre  $1 - 30$  para líquidos.

## 3.3.4

## Estudo da transferência de calor por convecção

Nesta seção, serão estudados os parâmetros responsáveis pela troca de calor entre fluidos, tais como: o coeficiente de troca de calor por convecção  $h$ , a taxa de transferência de calor, a temperatura superficial e a perda de carga, como mostra a figura 3.8.

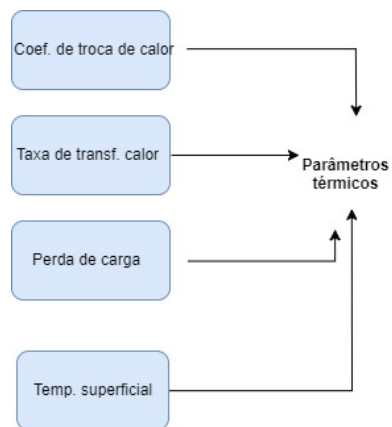
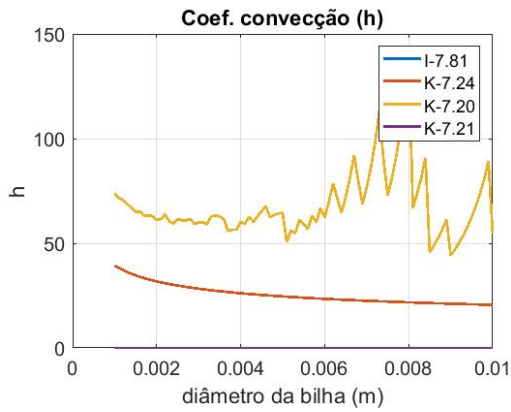


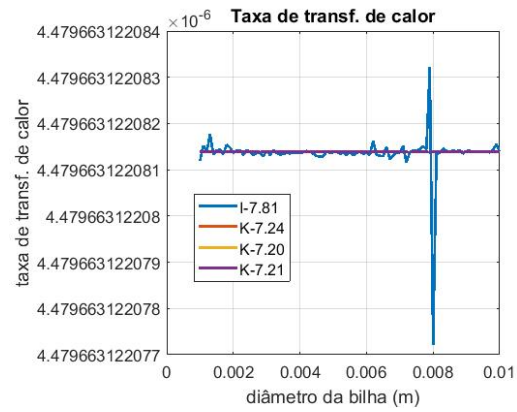
Figura 3.8: Parâmetros térmicos.

As figuras 3.9, 3.10 e 3.11 exibem os resultados dos cálculos dos parâmetros térmicos para o ar, água e etanol, respectivamente.

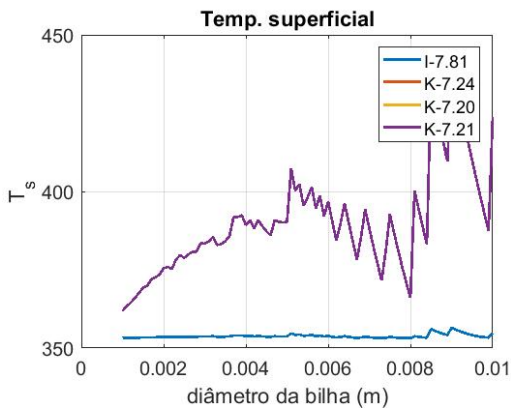
Ar



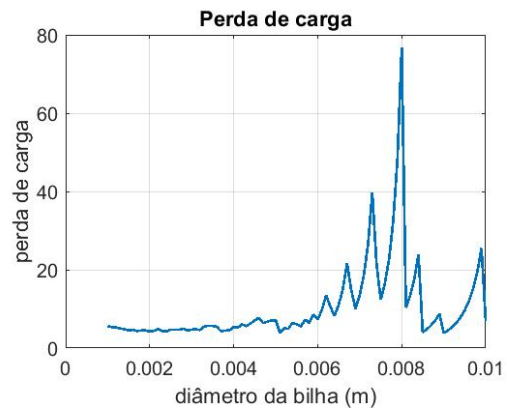
3.9(a): coeficientes de troca de calor por convecção em função do diâmetro das bilhas.



3.9(b): taxa de transferência de calor em função do diâmetro das bilhas.



3.9(c): temperaturas superficiais em função do diâmetro das bilhas.

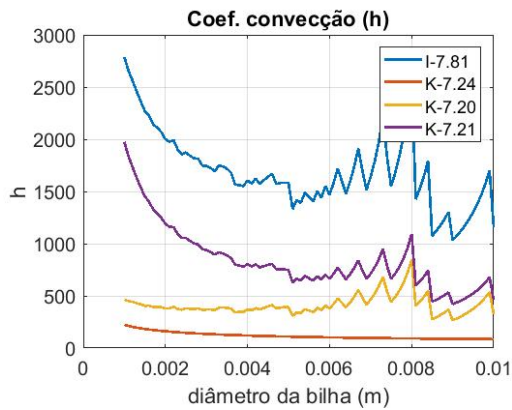


3.9(d): perda de carga em função do diâmetro das bilhas.

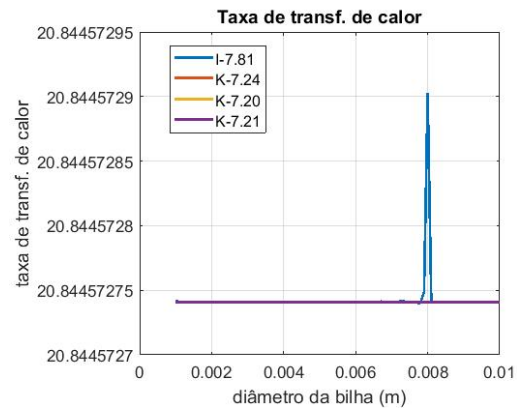
Figura 3.9: Parâmetros de transferência de calor para o ar, para um tubo de  $D = 0,25$  m e  $L = 15$  cm.



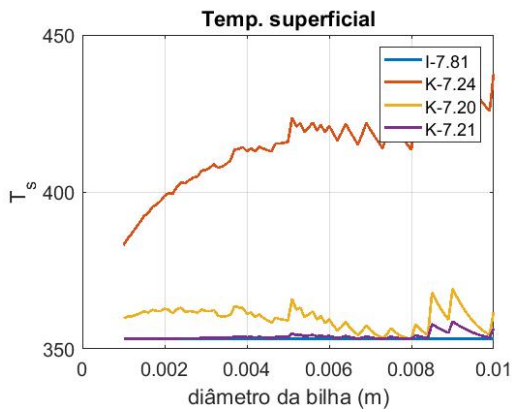
## Água



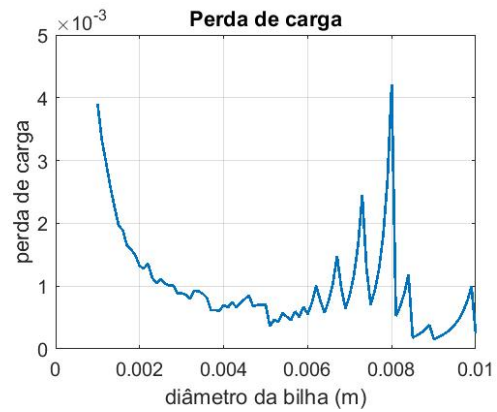
3.10(a): coeficientes de troca de calor por convecção em função do diâmetro das bilhas.



3.10(b): taxa de transferência de calor em função do diâmetro das bilhas.



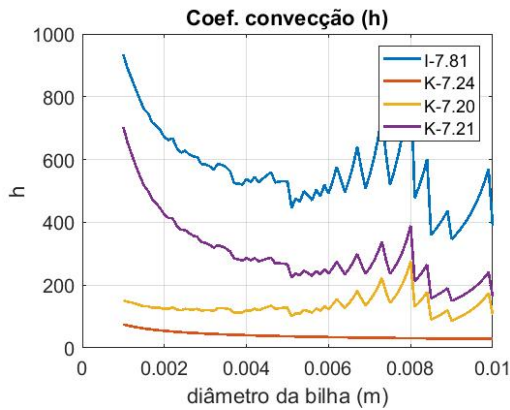
3.10(c): temperaturas superficiais em função do diâmetro das bilhas.



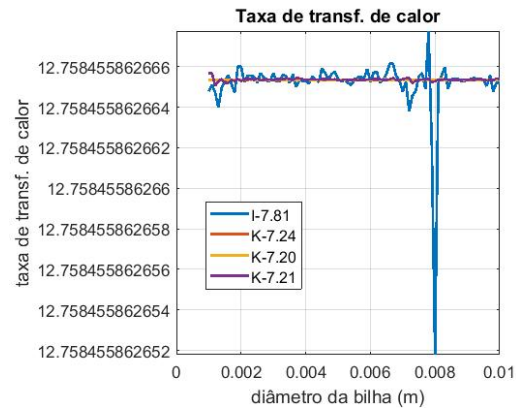
3.10(d): perda de carga em função do diâmetro das bilhas.

Figura 3.10: Parâmetros de transferência de calor para a água, para um tubo de  $D = 0,25$  m e  $L = 15$  cm.

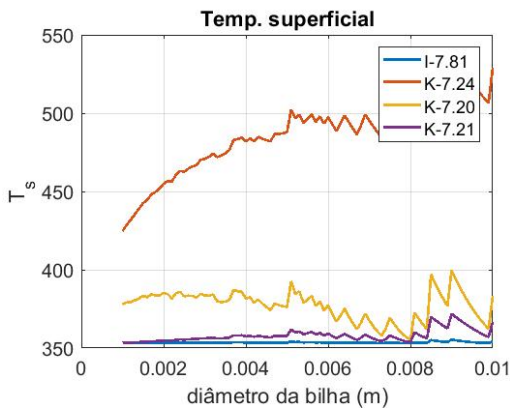
## Etanol



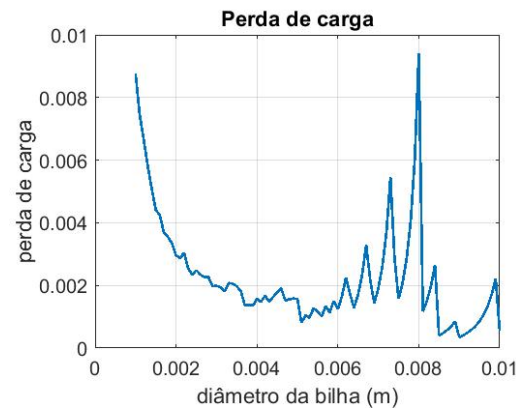
3.11(a): coeficientes de troca de calor por convecção em função do diâmetro das bilhas.



3.11(b): taxa de transferência de calor em função do diâmetro das bilhas.



3.11(c): temperaturas superficiais em função do diâmetro das bilhas.



3.11(d): perda de carga em função do diâmetro das bilhas.

Figura 3.11: Parâmetros de transferência de calor para o etanol, para um tubo de  $D = 0,25$  m e  $L = 15$  cm.

Observa-se que a taxa de transferência de calor é de  $4,5$  W para o ar,  $20,8$  W para a água e  $12,8$  W para o etanol, o que é necessário para garantir que a temperatura destes fluidos aumente de  $20^{\circ}\text{C}$  para  $78^{\circ}\text{C}$ .

Isto foi realizado com o coeficiente de transferência de calor,  $h$ , de  $25 - 75$   $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  para o ar,  $500 - 2000$   $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  para a água e  $200 - 800$   $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  para o etanol.

Para todos os fluidos, a temperatura superficial do tubo situa-se na faixa de  $300 - 400$  K.

As oscilações do coeficiente de transferência de calor, da temperatura superficial, número de Nusselt e do fator de atrito estão relacionadas àquelas da fração de vazio do leito recheado.

### 3.3.5

#### Estudo de custos

Para otimizar os custos do projeto, foram estudados diversas maneiras de equilibrar o custo-benefício.

Para a compra das bilhas esféricas (onde os cálculos foram feitos para diâmetros entre 1 e 10 milímetros), foi feito um orçamento na loja "Ícaro Comércio de Rolamentos", no bairro de São Cristóvão, para bilhas de aço, cujos preços encontram-se na tabela 3.3: (o fabricante tinha bilhas somente a partir de 2mm)

Tabela 3.3: Estudo de custos para bilhas de aço.

Diâmetro [mm]	Quantidade necessária	Valor unidade [R\$]	Valor total [R\$]
2	10800	0,25	2700
3	3400	0,25	850
4	1500	0,3	450
5	810	0,35	283,5
6	475	0,4	190
7	321	0,5	160,5
8	244	0,7	170,8
9	134	0,8	107,2
10	106	1	106

Podemos ver os dados em uma curva de custos feitas no Excel (figura 3.12), juntamente com uma equação polinomial (Eq. (3-1)) que melhor se ajusta aos pontos.

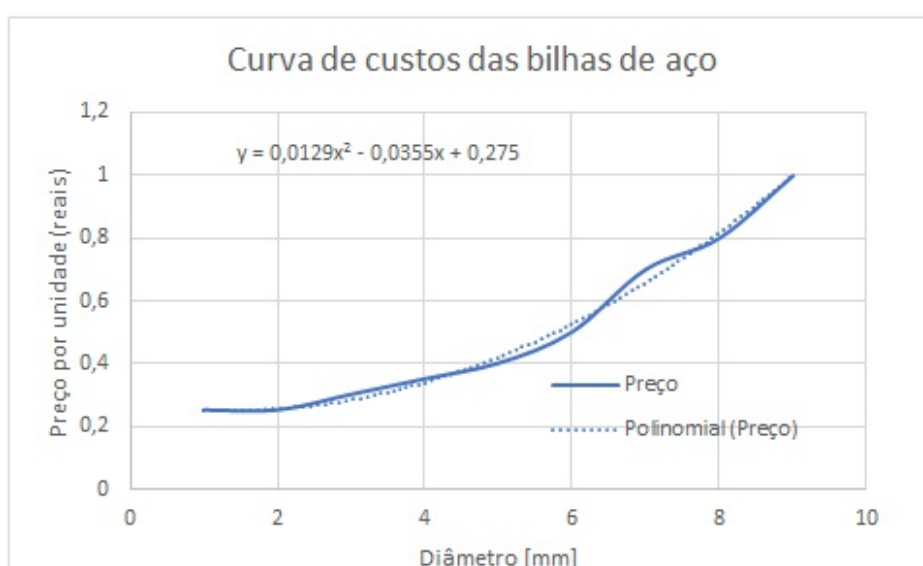


Figura 3.12: Curva de custos para bilhas de aço.

$$y = 0,0129x^2 - 0,0355x + 0,275 \quad (3-1)$$

A curva de custo total pode ser ajustada pela seguinte equação:

$$y = 2413,3x^{-1,476} \quad (3-2)$$

Cujo o gráfico pode ser exibido na figura 3.13:

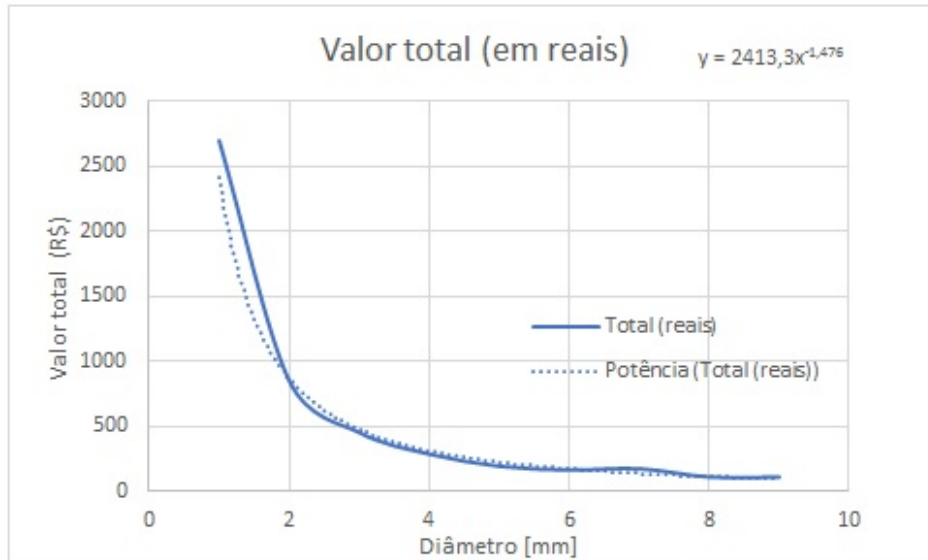


Figura 3.13: Custo total para bilhas de aço.

Como a quantidade de bilhas necessárias é muito alta, e consequentemente o preço, uma outra solução foi proposta: bijuterias ("miçangas") de metal.

A figura 3.14 mostra um comparativo de preços entre bilhas de aço e miçangas de latão:

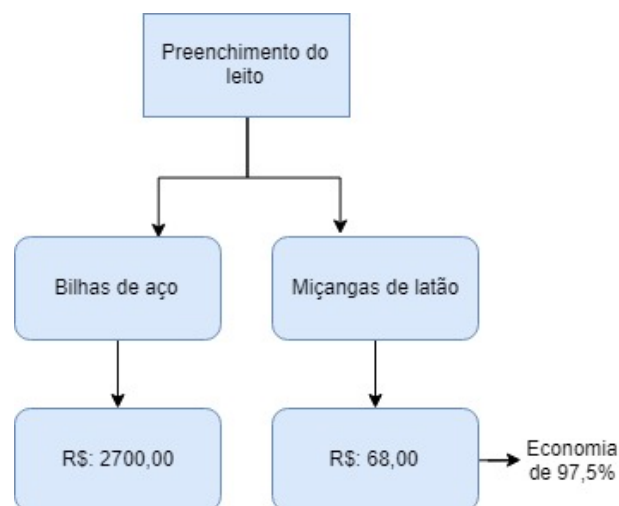


Figura 3.14: Comparação entre bilhas de aço e miçangas de latão para preenchimento do leito.

O valor total gasto na compra de 30 g de miçangas, na Casa Azevedo, localizada no Centro do Rio, uma quantidade mais que o suficiente para preencher o tubo e sobrar, foi R\$: 68,00. Comparando com o valor das bilhas de aço, que custariam R\$: 2700,00, **a economia chega em R\$: 2632,00, ou 97,5%.**

### 3.4

#### Resultado do processo de dimensionamento

A solução escolhida para este trabalho foi utilizar esferas de 2 mm. Esta escolha é motivada por uma menor temperatura de superfície do tubo e pela disponibilidade de esferas de baixo custo com este diâmetro. Esta temperatura é compatível com a de operação das fitas térmicas disponíveis.

As bilhas seriam inicialmente de aço, mas pelo estudo de preços, foi decidido utilizar uma esfera de bijuteria (vulgo "miçanga") de material metálico, mais precisamente latão com revestimento niquelado.

O leito é representado na figura 3.15.

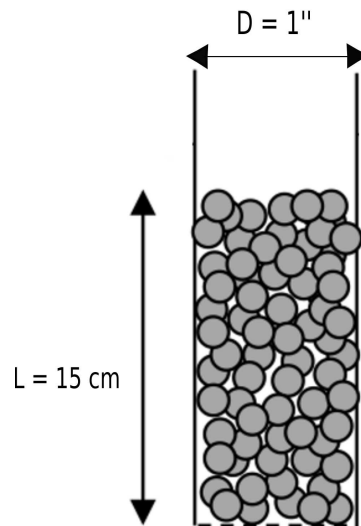


Figura 3.15: Representação do leito recheado. Adaptado de [10].

A figura 3.16 exibe o esquema da instalação experimental:

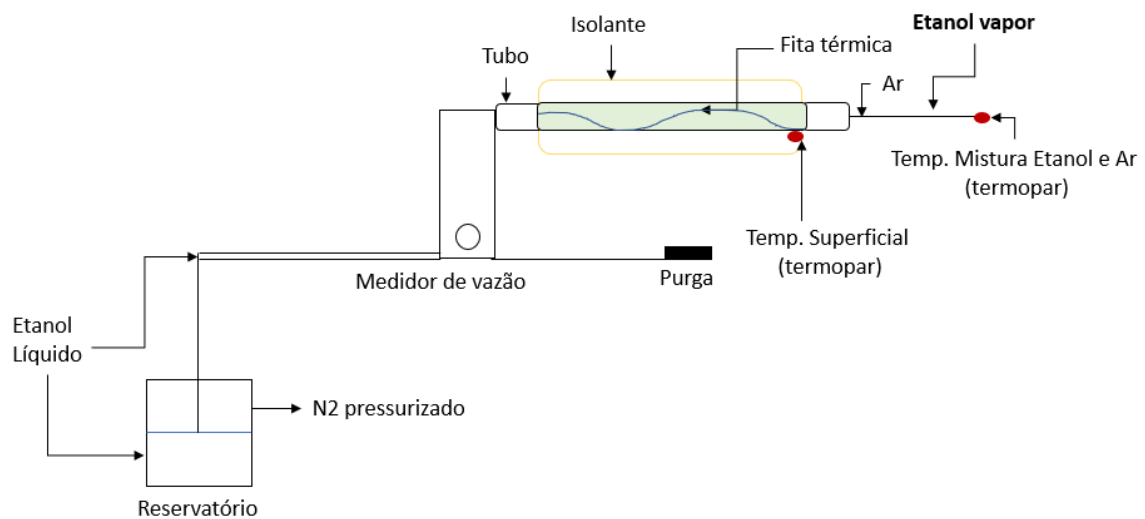


Figura 3.16: Esquema da instalação experimental.

A seguir, temos a imagem da instalação experimental original (Fig. 3.17):

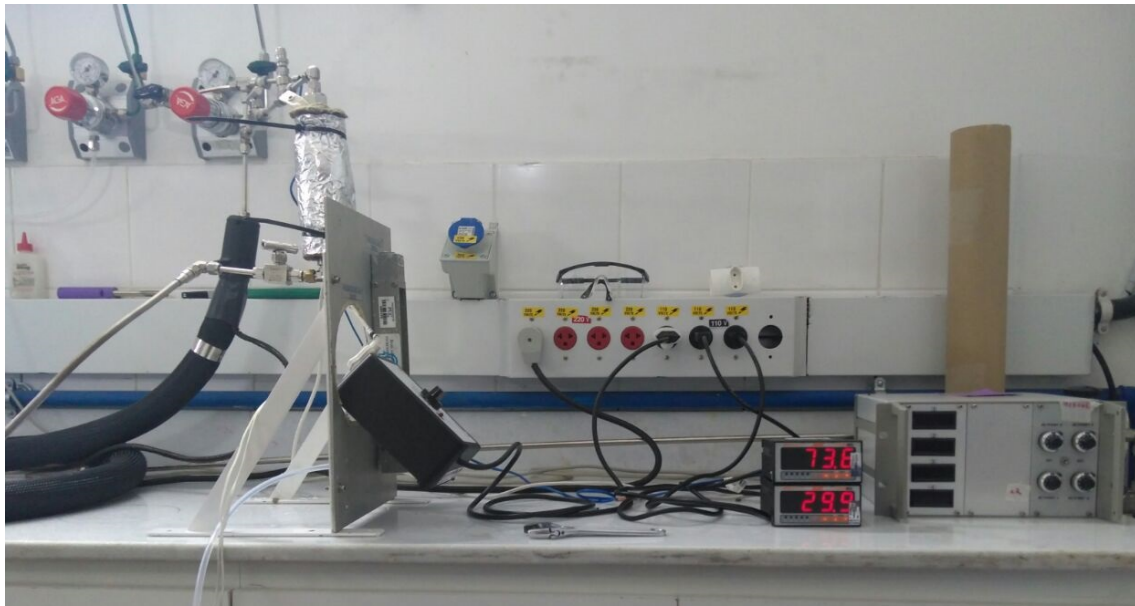


Figura 3.17: Esquema da instalação experimental original ( $D = 25,4\text{ mm}$  e  $L = 15\text{ cm}$ ).

## 4

### Ensaio do aquecedor

Este capítulo exibirá toda a parte de resultados experimentais do trabalho: os ensaios envolvendo água, etanol e a calibração do medidor de vazão.

#### 4.1

##### Calibração do medidor de vazão

Na primeira parte do experimento, foi decidido calibrar o medidor de vazão, que apresentava a unidade  $Nm^3/h$  de ar .

Com isso, foi realizado um experimento com água para medir a vazão em  $mL/s$  e fazer a equivalência com a unidade de vazão exibida no medidor. Esta medida foi feita empregando-se um Becker de 500  $mL$  e um cronômetro. Cada ponto de operação foi repetido três vezes.

Tabela 4.1: Vazões indicadas e reais para gerar a curva de calibração.

Vazão indicada [ $Nm^3/h$ ]	Tempo [ $s$ ]	Vazão real $H_2O$ [ $mL/s$ ]
0.16	03:23:53	0,3930
0.16	03:37:37	0,3680
0.16	03:31:49	0,3782
0.40	01:23:10	0,9227
0.40	01:18:12	1,0293
0.40	01:17:26	1,0354
0.72	00:40:17	1,9915
0.72	00:41:13	1,9641
0.72	00:40:10	1,9002

A partir dos dados da tabela 4.1, foi gerada a curva de calibração, exibida na figura 4.1, cuja equação de tendência se comporta da seguinte forma:

$$y = 2.8173x - 0.0929 \quad (4-1)$$



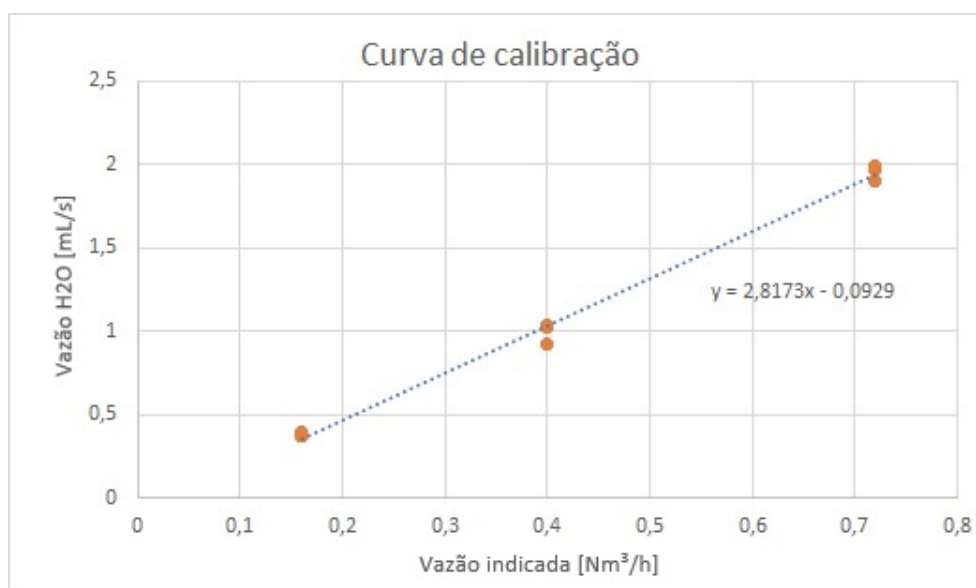


Figura 4.1: Curva de calibração do medidor de vazão.

## 4.2

### Ensaios com água

Após o medidor de vazão ser calibrado, foi feito um ensaio com água a fim de verificar a segurança (se havia vazamentos) e garantir que todas as partes necessárias para o experimento estavam funcionando, como por exemplo, verificar se a fita térmica estava funcionando e testar as temperaturas atingidas na saída do tubo e na mistura, como também verificar a vaporização da água.

O ensaio foi concluído com sucesso: conseguimos realizar a vaporização da água e consertar os vazamentos presentes nas conexões.

Conseguimos alcançar altas temperaturas de superfície (180°C) na saída do tubo, o que garantiu o bom funcionamento da fita térmica. Altas temperaturas também foram alcançadas na mistura ar e água (80°C), o que é satisfatório, porque é a temperatura de saturação do etanol.

## 4.3

### Ensaios preliminares com C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (etanol)

Utilizando álcool etílico (comercial), foi realizado o ensaio com etanol a fim de realizar a sua vaporização completa.

As temperaturas da mistura foram superior à de ebulição, e ocorreu uma vaporização de etanol bem sucedida na saída do leito fixo para baixas vazões (1,9 mL/s).

Porém, ocorreu condensação do etanol na tubulação de alimentação do experimento, o que mostrou a necessidade de alterar o projeto.

A mudança constou em alterar o tubo, fazendo uma redução do diâmetro de  $25,4\text{ mm}$  para  $9\text{ mm}$  e aumento do comprimento aquecido de  $15\text{ cm}$  para  $40\text{ cm}$ .

Após a mudança do tubo, temos o novo esquema, como pode ser visto na figura 4.2:

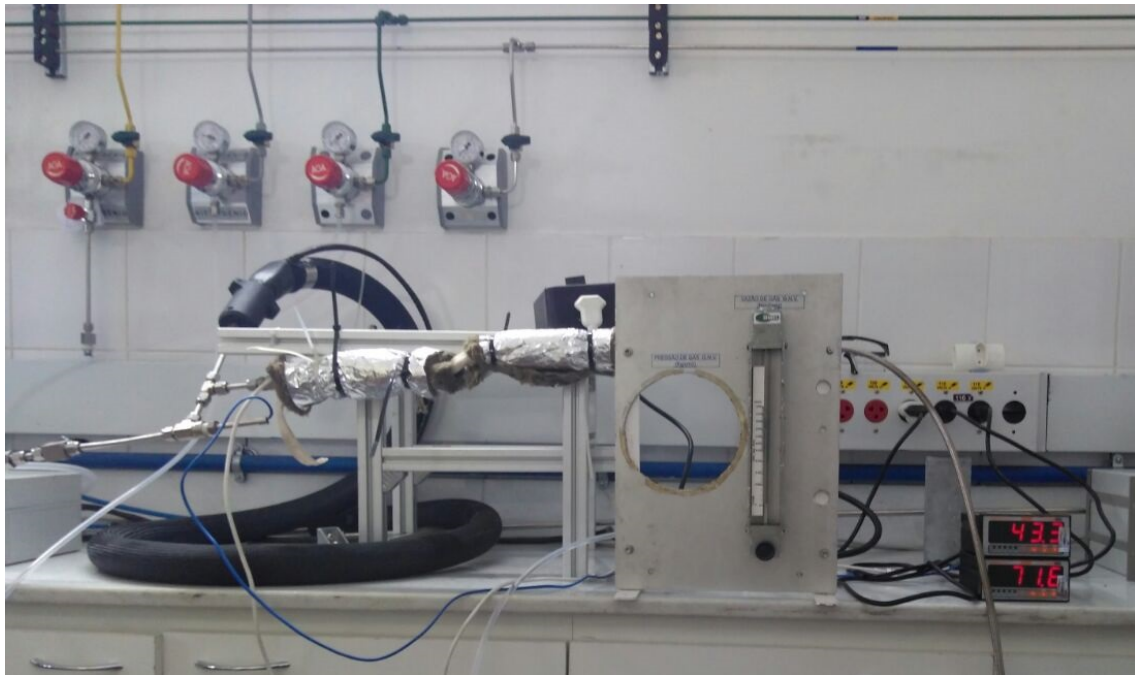


Figura 4.2: Esquema da instalação experimental modificada ( $D = 9\text{ mm}$  e  $L = 40\text{ cm}$ ).

#### 4.4

##### Ensaios finais com $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (etanol)

Após as modificações no tubo, foram ensaiadas diversas faixas de vazões de ar e de etanol, variáveis responsáveis pelas mudanças de temperaturas na saída do tubo e na mistura ar e etanol, como podemos ver na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Ensaio com etanol.

Caso	Vazão ar [ $\text{mL/s}$ ]	Vazão etanol [ $\text{mL/s}$ ]	$T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_m$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
1	1,05	0,07	170	77
2	0,9	0,07	168	90
3	0,75	0,04	167	86

A operação se manteve estável durante 2 – 3 minutos.

Foi possível queimar a mistura do combustível no queimador BEST Flame.

A figura 4.3 exibe a chama resultante da combustão:



Figura 4.3: Combustão do etanol ( $D = 9\text{ mm}$  e  $L = 40\text{ cm}$ ).

## 5

### Conclusões e perspectivas

Foi projetado, construído e ensaiado um leito recheado para vaporizar etanol em fluxo contínuo.

O projeto comparou o efeito do diâmetro das esferas sobre o coeficiente de troca de calor e temperatura superficial para escoamentos de ar/água/etanol.

Os primeiros ensaios com etanol mostraram que o aumento da temperatura de mistura não era suficiente para garantir o etanol vaporizado no queimador.

A instalação foi refeita e a mistura de ar/etanol no estado vapor foi obtida no queimador BEST Flame.

A perspectiva é ampliar a faixa de operação do vaporizador a partir dos resultados obtidos.

## Referências Bibliográficas

- [1] International Energy Agency - IEA  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/essentials2.pdf>  
Acesso em 07 de dezembro de 2017.
- [2] Ministério de Minas e Energia: "Reservas atuais de petróleo devem se esgotar em 40 anos"  
<https://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/revista-em-discussao-edicao-abril-2010/noticias/reservas-atuais-de-petroleo-devem-se-esgotar-em-40-anos-p10.aspx>  
Acesso em 19 de fevereiro de 2018.
- [3] "Cana: energia obtida a partir da palha pode atender 27% do consumo do país" Artigo original do site SF Agro | Farming Brasil:  
<http://sfagro.uol.com.br/cana-energia-obtida-a-partir-da-palha-pode-suprir-27-do-consumo>  
Acesso em 07 de dezembro de 2017.
- [4] Globo: "Produção de cana no Brasil aumenta em 2017"  
<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/agro-a-industria-riqueza-do-brasil/noticia/producao-de-cana-no-brasil-aumenta-em-2017.ghtml>  
Acesso em 19 de fevereiro de 2018.
- [5] "27% de etanol na gasolina: quais os efeitos para os nossos motores?"  
Artigo original do site FlatOut:  
<https://www.flatout.com.br/27-de-etanol-na-gasolina-quais-os-efeitos-para-os-nossos-motores/>  
Acesso em 07 de dezembro de 2017.
- [6] Tese USP: "Avaliação energética dos efluentes do processo industrial do álcool"  
[www.teses.usp.br/.../Avaliacaoexergeticadosefluentesdoprocessoindustrialdoalcoool.pdf](http://www.teses.usp.br/.../Avaliacaoexergeticadosefluentesdoprocessoindustrialdoalcoool.pdf)  
Acesso em 19 de fevereiro de 2018.
- [7] Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S. Fundamentos da Transferência de Calor e Massa; Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [8] F. Kreith; R. M. Manglik; M. S. Bohn. Principles of Heat Transfer 7 ed.; Stamford: CENGAGE Learning, 2011.

- [9] Slide share: Heat Transfer In Packed Bed, Preeti Birwal, PHD, NDRI <https://www.slideshare.net/preetibirwal007/heat-transfer-in-packed-bed>  
Acesso em 04 de fevereiro de 2018.
- [10] "Chegg Study"  
<http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/commercial-process-two-packed-fluidized-beds-operated-series-flow-first-bed-do>  
Acesso em 04 de fevereiro de 2018.

## A

### Propriedades termofísicas dos fluidos utilizados

Este anexo exhibe as propriedades termofísicas dos fluidos ar, água e etanol necessárias aos cálculos. Todas as propriedades foram retiradas de [7].

#### A.1

##### Propriedades termofísicas do ar

Tabela A.1: Propriedades do ar.

<b>Propriedades do ar a 298 K (<math>T_{entrada}</math>)</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$181 \times 10^{-7}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	1.1992	$kg/m^3$
Calor específico térmico	$c_p$	$1.0069 \times 10^{-3}$	$J/(kg.K)$
Número de Prandtl	$Pr$	0.7088	—
Condutividade térmica	$k$	$25.7400 \times 10^{-3}$	$W/(m.K)$
<b>Propriedades do ar a 323 K (<math>T_{media}</math>)</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$195.456 \times 10^{-7}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	1.08	$kg/m^3$
Calor específico térmico	$c_p$	$1.00792 \times 10^{-3}$	$J/(kg.K)$
Número de Prandtl	$Pr$	0.7038	—
Condutividade térmica	$k$	$28.0020 \times 10^{-3}$	$W/(m.K)$
<b>Propriedades do ar a 351 K</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$208.67 \times 10^{-7}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	0.99	$kg/m^3$
Calor específico térmica	$c_p$	$1.00904 \times 10^{-3}$	$J/(kg.K)$
Número de Prandtl	$Pr$	0.6998	—
Condutividade térmica	$k$	$30.0760 \times 10^{-3}$	$W/(m.K)$

## A.2

### Propriedades termofísicas da água

Tabela A.2: Propriedades da água.

<b>Propriedades da água a 298 K (<math>T_{entrada}</math>)</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$1.0074 \times 10^{-3}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	1001.5	$kg/m^3$
Calor específico térmico	$c_p$	$4.18 \times 10^3$	$J/(kg.K)$
Número de Prandtl	$Pr$	6.996	—
Condutividade térmica	$k$	$8.8 \times 10^{-3}$	$W/(m.K)$
<b>Propriedades da água a 323 K (<math>T_{media}</math>)</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$547.6 \times 10^{-6}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	1012	$kg/m^3$
Calor específico térmico	$c_p$	$4.18 \times 10^3$	$J/(kg.K)$
Número de Prandtl	$Pr$	3.53	—
Condutividade térmica	$k$	$643 \times 10^{-3}$	$W/(m.K)$
<b>Propriedades da água a 351 K</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$365 \times 10^{-6}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	1027	$kg/m^3$
Calor específico térmica	$c_p$	$4.1914 \times 10^3$	$J/(kg.K)$
Número de Prandtl	$Pr$	2.29	—
Condutividade térmica	$k$	$668 \times 10^{-3}$	$W/(m.K)$



### A.3

#### Propriedades termofísicas do etanol

Tabela A.3: Propriedades do etanol.

<b>Propriedades do etanol a 298 K (<math>T_{entrada}</math>)</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$1.195 \times 10^{-3}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	789.24	$kg/m^3$
Calor específico térmico	$c_p$	2395.82	$J/(kg.K)$
Tensão superficial	$\sigma$	$22.80 \times 10^{-3}$	$N/m$
Número de Prandtl	$Pr$	16.9	—
Condutividade térmica	$k$	0.16916	$W/(m.K)$
<b>Propriedades do etanol a 323 K (<math>T_{media}</math>)</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$0.700 \times 10^{-3}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	763	$kg/m^3$
Calor específico térmico	$c_p$	2674.21	$J/(kg.K)$
Tensão superficial	$\sigma$	$20.09 \times 10^{-3}$	$N/m$
Número de Prandtl	$Pr$	11.6	—
Condutividade térmica	$k$	0.16171	$W/(m.K)$
<b>Propriedades do etanol a 351 K (<math>T_{saturacao}</math>)</b>			
Viscosidade dinâmica	$\mu$	$0.4480 \times 10^{-3}$	$Pa.s$
Densidade	$\rho$	736.652	$kg/m^3$
Calor específico térmico	$c_p$	3001.6	$J/(kg.K)$
Tensão superficial	$\sigma$	$17.5140 \times 10^{-3}$	$N/m$
Número de Prandtl	$Pr$	8.674	—
Condutividade térmica	$k$	0.1551	$W/(m.K)$
Entalpia de vaporização	$h_{fg}$	846	$kJ/kg$

### A.4

#### Outras propriedades

Tabela A.4: Outras propriedades.

Aceração da gravidade	$g$	9,81	$m/s^2$
-----------------------	-----	------	---------