



**Rodrigo Lopes Alves D'Amico**

**Determinação experimental do coeficiente de  
troca de calor de um escoamento de areia  
transversalmente a um tubo**

**Projeto de Graduação**

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

Orientador: Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2017

## Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus amigos os quais me acompanharam nesse desafio diário que é a graduação em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Tanto àqueles que fiz durante a faculdade, em especial Camila Viana, Carlos Estevão, Danielle Cohen, Flávia Belém, Gabriel Fischer e Isabel Camerini, quanto àqueles os quais conheci fora da mesma, em especial Eduardo Pacheco, Felipe Lamas, Fillipe Pinho.

À equipe Riobotz, da qual fui membro por quase três anos, por fornecer um ambiente de divertimento e aprendizado. Além disso, por ter sido uma fonte inesgotável de conhecimento, auxiliando na minha trajetória tanto no caráter profissional como no pessoal. Ademais, por ter me dado a oportunidade de participar de competições nacionais e internacionais, ampliando minha visão sobre a engenharia de outros países e regiões do Brasil.

À equipe Reptiles, a qual sempre foi muito prestativa e amiga da equipe Riobotz. Seja fornecendo o seu espaço no laboratório, equipamentos de usinagem ou companhia no nosso dia a dia, ela sempre esteve presente tanto nos melhores momentos quanto nos mais difíceis.

À todos os professores que tive durante a faculdade, em especial ao Marco Meggiolaro, coordenador da equipe Riobotz, ao professor Igor Braga, o qual me ajudou a realizar uma série de cálculos deste relatório, e ao professor, e meu orientador, Sergio Braga, com quem tive o prazer de conviver para realização desse projeto.

Por último, porém não menos importante, à minha família. A qual, diariamente, mesmo que sem perceber, minha servia como exemplo de superação e força. Assim, ela sempre me ensinou os princípios nos quais eu norteio minha vida.

## Resumo

### **Determinação experimental do coeficiente de troca de calor de um escoamento de areia transversalmente a um tubo**

No cenário atual, a quase totalidade da energia que o homem utiliza é produzida sob demanda. Seu armazenamento se dá em represas ou sob forma de combustíveis, entre outros. Com o aumento da geração renovável, principalmente a partir das fontes solar e eólica, faz-se necessário desenvolver outras formas de armazenamento. Os centros de pesquisa buscam um método eficiente para tal. O objetivo desse projeto é analisar a viabilidade de um novo método de armazenamento de energia térmica, proveniente do Sol, usando partículas sólidas, uma espécie de areia, em substituição aos fluídos comumente utilizados (óleo ou sal fundido). Este projeto visa a determinação do coeficiente de troca térmica desta 'areia' ao escoar externamente a um tubo. Um experimento será montado, onde a areia a uma temperatura elevada escoará ao redor de um tubo por onde passa água a ser aquecida. O resultado mostrará se a utilização desse material pode ser considerada em projetos futuros de armazenamento.

### **Palavras-chave**

areia; armazenamento de energia térmica; coeficiente de troca de calor; convecção;

## **Abstract**

### **Experimental determination of the heat exchange coefficient of sand flowing transversely to a tube**

Nowadays, almost all energy consumed by people is generated on demand. Its storage is represented by different types of gas and water blockages. Given the uprising of energy generation using renewable sources, such as solar and wind power, it is necessary to develop new energy storage methods. Research centres aim their studies to finding an efficient method for such purpose. The objective of this project is to analyse the viability of a new thermal energy storage method, using energy provided by the Sun, within solid particles, a type of sand, rather than the commonly used fluids (as oils and melted sand). In order to do that this project seeks the determination of the heat exchange coefficient of this type of sand when flowing externally to a tube through which water to be heated flows. The result will inform whether or not this type of material can be considered in future energy storage projects.

## **Keywords**

convection; heat transfer coefficient; thermal energy storage; sand.

## Sumário

1	Introdução	<b>8</b>
1.1	Por que areia?	9
2	Objetivo	<b>11</b>
2.1	Objetivo específico	11
3	Análise teórica	<b>12</b>
3.1	Condução	12
3.2	Convecção	12
3.3	Termopares	12
4	Procedimento	<b>14</b>
4.1	Descrição da experiência	14
4.2	Precauções	16
5	Modelagem matemática	<b>18</b>
5.1	Cálculo do coeficiente de troca de calor da areia	18
5.2	Análise de Incertezas	20
6	Resultados	<b>22</b>
6.1	Valores utilizados	22
6.2	Comprovação das hipóteses	22
6.3	Cálculo dos coeficientes de troca térmica	26
6.4	Incerteza do cálculo	27
7	Conclusão	<b>29</b>

## Lista de figuras

1.1	Temperatura de trabalho de fluídos	10
3.1	Figura ilustrativa de um termopar tipo k	13
4.1	Esquema ilustrativo da experiência	15
4.2	Circuito eletrônico montado para aquisição de dados, onde pode-se ver a placa Elegoo Mega2550 em azul e o display lcd.	15
4.3	Estrutura montada mostrando a lã de vidro englobando o duto de exaustão e o duto de cobre atravessando o mesmo.	16
4.4	Saída de água do duto de cobre e a balança com o balde em cima para medição da vazão mássica.	16
5.1	Esquema da vista de um corte transversal aos dutos	18
6.1	Gráfico da massa de água vs. Tempo	23
6.2	Gráfico da temperatura de saída da água vs. Tempo	23
6.3	Gráfico da temperatura de entrada da água vs. Tempo	24
6.4	Gráfico da temperatura do fluído vs. Tempo	24

## Lista de tabelas

1.1	Valores para o coeficiente de troca de calor para diversas situações.	9
6.1	Lista de valores utilizados	22

# 1

## Introdução

Atualmente, existe uma crescente preocupação com impactos ambientais, especialmente no setor energético. Isso leva ao surgimento e aprimoramento de novas formas renováveis de obtenção de energia, como solar, eólica e geotérmica.

Por sua natureza, conectar aquelas fontes a rede não é uma tarefa trivial. Isso ocorre devido ao fato delas serem mais produtivas em determinadas horas do dia, sendo capazes de produzir até mais do que o necessário, enquanto que fora desse período ótimo de trabalho, elas podem não gerar o suficiente para atender a demanda.

Isso é visto como um problema pois, quase a totalidade da energia consumida pelo homem é produzida sob demanda. Por isso, empresas geradoras de energia precisam planejar o quanto elas produzirão no futuro próximo. Elas tentam prever o quanto de energia será consumida por meio de dados históricos corrigidos por fórmulas complexas para se ajustarem as condições atuais.

Porém, como tais fontes renováveis dependem de condições climáticas para sua operação, imprevistos podem ocorrer no seu funcionamento. Elas podem gerar mais energia do que o planejado, assim haverá um excesso de energia, ou podem não gerar o suficiente, criando um déficit de energia. Em qualquer uma das possibilidades, haverá um desbalanceamento entre demanda e produção.

Esse problema leva a seguinte dúvida: como é possível contornar a diferença entre demanda e produção de energia em fontes renováveis, como eólica e solar, para que no futuro elas possam ser os principais métodos utilizados?

A resposta é simples: armazenando o excedente produzido e o utilizando para suprir o déficit.

O calor armazenado pode ser utilizado para estabilizar e possibilitar a geração de eletricidade durante a noite e em dias nublados, assim como aumentar a geração de energia em horários de pico.

Além disso, ao armazenar energia, reduz-se a necessidade de uma capacidade máxima de produção igual ao máximo da demanda, pois ela não precisa ser capaz de produzir esse pico. Para atender a esse pico, ela utilizará sua capacidade de produção mais a energia que ela possui armazenada. Assim, menos infraestrutura é necessária, reduzindo também os custos operacionais.

Estes são alguns dos motivos pelo qual o tópico armazenamento de energia está sendo muito estudado atualmente. Já existem diversos métodos para armazenar energia, utilizando represas ou sob formas de combustíveis, entre outros. No entanto, nenhum destes, atualmente, é capaz de armazenar energia em larga escala.

Nesse sentido, esse relatório visa estudar um novo método para armazenamento de energia térmica, proveniente do Sol. Este consiste em usar areia, formada por partículas sólidas, em vez de fluidos, os quais são os mais utilizados.

## 1.1 Por que areia?

Aqui cabe uma explicação do porquê entre tantas outras substâncias, a areia foi escolhida.

A troca de calor por convecção depende de três parâmetros físicos: o coeficiente de troca de calor, a área de troca de calor, e a diferença de temperatura.

A ideia de usar partículas sólidas para trocar calor não é surpreendente. A tabela 1.1<sup>1</sup> mostra alguns dados interessantes. Partículas sólidas possuem um coeficiente de convecção forçada que pode ser até 10000 vezes maior do que o do ar, 100 vezes maior que o da água. Visto esse enorme ganho nesse coeficiente, elas são de grande interesse para esse fim.

Tabela 1.1: Valores para o coeficiente de troca de calor para diversas situações.

Situação Física	$kW/m^2K$
Convecção Natural, ar	0.006-0.035
Convecção Forçada, ar	0.028-0.851
Convecção Natural, água	0.170-1.14
Convecção Forçada, água	0.570-22.7
Água em Ebulição	5.70-85
Vapor em Condensação	57-170
Convecção Forçada, sólido	113-227

Porém, normalmente, os fluidos possuem uma área de troca de calor muito maior que os sólidos, sendo esse um dos motivos pela sua preferência. No entanto, sabe-se que superfície de contato e tamanho do objeto são inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor for a partícula maior será

<sup>1</sup>Tabela retirada do livro “Transmissão de Calor” escrito por Washington Braga Filho

sua área de troca. Sendo assim, pode-se reduzir o tamanho do sólido a tal ponto em que essa diferença na área de troca seja desprezível.

Certamente seria trabalhoso, do ponto de vista de usinagem, subdividir sólidos em grãos mínimos. Logo, para sua utilização, seria necessária uma substância que por natureza seja pequena o suficiente para reduzir ao máximo essa desvantagem. Tendo em vista essa necessidade dimensional a areia se apresenta como uma solução para tal problema.

Outro fator importante é a diferença de temperatura. Sendo  $\Delta T = T_{\infty} - T_s$ , é trivial que para uma mesma temperatura da superfície ( $T_s$ ), quanto maior a temperatura máxima alcançada pelo meio, maior será a diferença de temperatura. E conseqüentemente maior será a troca de calor.

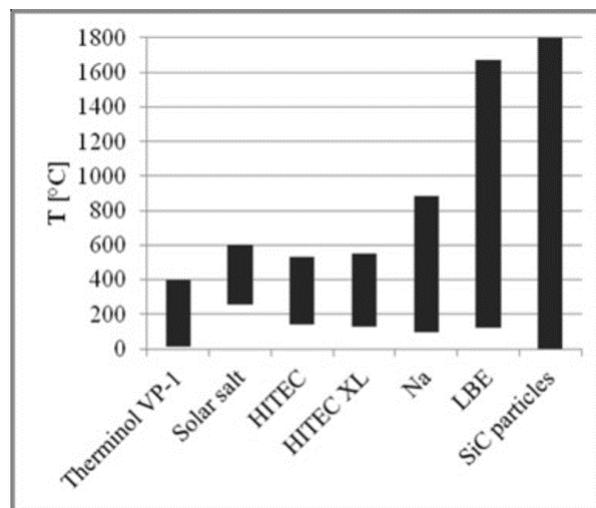


Figura 1.1: Temperatura de trabalho de fluídos

Logo, existe um interesse muito grande na temperatura máxima da partícula quente. Como é possível ver pela figura 1.1<sup>2</sup>, a areia, “SiC particles”, resiste a temperaturas maiores que os sais e fluídos comumente utilizados. Sendo assim, ela prova ser de grande interesse para fins de troca de calor.

Existe também uma vantagem econômica muito grande na utilização de areia. Principalmente em países que a possuem em abundância, ela é muito mais barata que os sais modernos. Além disso, ela precisa de muito pouco tratamento químico. Sendo assim, é mais barato e menos trabalhoso trabalhar com areia.

Resumindo, a areia é uma partícula sólida, pequena, resistente à temperaturas elevadas e barata. Por esses motivos, ela foi escolhida como objeto de estudo para esse experimento.

<sup>2</sup>BENOIT, H., L. SPREAFICO, D. GAUTHIER AND G. FLAMANT Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3// 2016, 55, 298-315.

## 2 Objetivo

O objetivo deste projeto de final de curso é analisar a viabilidade de um outro método de armazenamento de energia térmica, proveniente do Sol, usando areia, uma partícula sólida, em vez dos fluídos comumente utilizados.

### 2.1 Objetivo específico

O projeto de armazenamento de energia pode ser dividido em duas partes: a primeira consiste em armazenar a energia solar sob forma de energia térmica na areia; e a segunda seria o consumo dessa energia térmica armazenada na areia.

Esse relatório focará na segunda parte desse processo. Assim, será dado um enfoque maior na capacidade da areia fornecer o calor nela armazenado. Especificamente nesse projeto, será estudado a troca de calor por convecção e será calculado o coeficiente de troca de calor por convecção da areia para fins de comparação com os dos fluídos e sais atualmente utilizados.

## 3

### Análise teórica

#### 3.1

##### Condução

A condução pode ser vista como o método de transferência de energia devido à interação entre partículas. Temperaturas mais elevadas estão associadas à níveis de energia mais altos, e assim, quando moléculas vizinhas se chocam, o que elas fazem constantemente, ocorre uma transferência de energia entre elas. Esse modo de troca de calor pode ser equacionado pela *Lei de Fourier*

$$q''_x = -k * \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3-1)$$

onde  $q''_x$  é o fluxo de calor na direção x;  $k$  é o coeficiente de condutividade térmica;  $\frac{\partial T}{\partial x}$  é o gradiente de temperatura na direção x.

#### 3.2

##### Convecção

Convecção é um modo de transferência de calor que ocorre com o contato entre fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a temperaturas diferentes. Esse modo de troca de calor geralmente é equacionado pela *lei de Newton* do resfriamento como

$$\dot{Q}_{conv} = h * A * \Delta t \quad (3-2)$$

onde  $\dot{Q}_{conv}$  representa o calor trocado por convecção;  $h$  simboliza o coeficiente de transferência de calor por convecção;  $A$  representa a área de contato entre as substâncias e  $\Delta t$  é a diferença de temperatura entre o fluido e a superfície.

#### 3.3

##### Termopares

Termopares são sensores de temperatura, constituídos por dois fios de metais diferentes juntos em uma extremidade e livres na outra.

A extremidade junta responde a temperatura com a criação de um potencial elétrico ao longo dos fios. Na extremidade livre, a ponta de cada fio é presa à um circuito externo, sendo que essas junções precisam ser isotérmicas para o correto funcionamento do termopar. Tal circuito externo é então capaz de relacionar o potencial elétrico criado com a temperatura sentida pela extremidade junta.

Existem diversos tipos de termopares, variando, principalmente, os metais dos quais os fios são feitos. Assim, para cada tipo existem temperaturas de trabalho, custo, longevidade diferentes.

Termopares tipo K são formados por fios de Cromel e Alumel. Produzem uma diferença de potencial de até  $55mV$  e temperatura de trabalho entre  $-200C$  &  $1250C$  [11]



Figura 3.1: Figura ilustrativa de um termopar tipo k

## 4

### Procedimento

Nessa parte do relatório será detalhado o procedimento adotado para realização desse projeto.

#### 4.1

##### Descrição da experiência

Nessa experiência, areia será aquecida utilizando uma resistência elétrica. Após atingir aproximadamente  $250^{\circ}\text{C}$ , ela será depositada em um reservatório, chamado aqui de reservatório de areia quente. Este terá furos no seu fundo para permitir um fluxo de areia quente. Tal areia escoará através de um duto de exaustão para um segundo reservatório.

Dois furos diametralmente opostos, e na mesma altura, foram feitos no duto de exaustão para permitir que um duto de cobre o atravessasse perpendicular à direção de escoamento da areia. Por esse duto de cobre, escorá água, proveniente de uma caixa d'água até um balde.

Para evitar perdas de calor para o meio externo, o duto de exaustão foi envolvido por lã de vidro. Tal material é conhecido pela sua baixa condutividade térmica, o que o torna um ótimo isolante térmico. Assim, pode-se desprezar o calor perdido para o meio externo e considerar o duto de exaustão como um recipiente adiabático.

Dessa maneira, areia, a qual terá seu fluxo dentro do duto de exaustão, trocará calor por convecção com a água, a qual estará fluindo pelo tubo de cobre perpendicularmente ao fluxo da areia.

A figura 4.1 representa esquematicamente o que foi descrito acima.

Para que se possa quantificar as grandezas envolvidas na experiência, sensores foram utilizados. Termopares foram utilizados para medir as temperaturas da água tanto antes como depois de trocar calor com a areia e um terceiro termopar foi utilizado para medir a temperatura do ambiente dentro do duto de exaustão.

Além deles, uma balança foi posta embaixo do balde de água de quente para que se possa calcular a vazão mássica da água. Uma câmera filmadora foi instalada e apontada para o display da balança. Assim, foi possível obter os valores de  $m_{agua}$  e  $\Delta T$ , para que se possa calcular a vazão mássica da água,  $\dot{m}_{agua}$ .

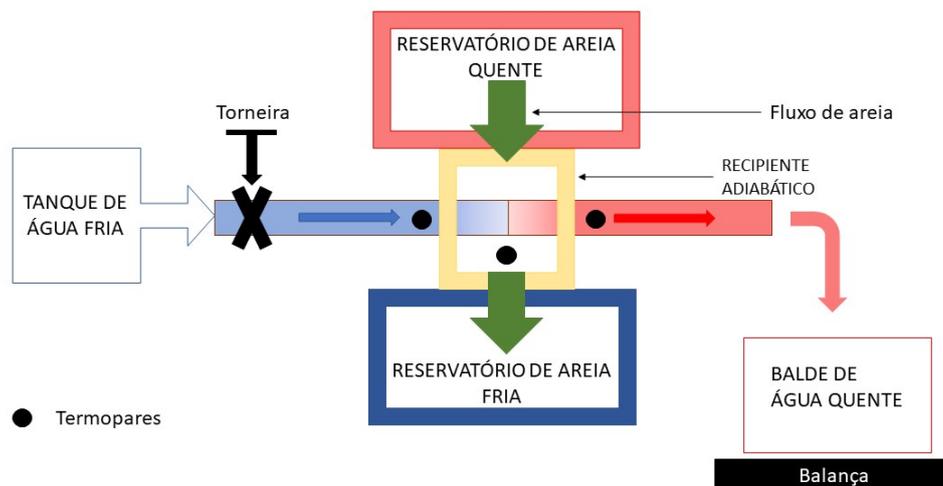


Figura 4.1: Esquema ilustrativo da experiência

Para a aquisição dos dados foi utilizada uma placa processadora Elegoo Mega2250, na qual foram conectados os três termopares utilizados. Além disso, um display de lcd foi utilizado para mostrar as temperaturas durante a experiência. Para a programação de tal placa foi utilizado o software Arduino 1.8.4.

As figuras abaixo mostram tanto o aparato mecânico quanto eletrônico criado.

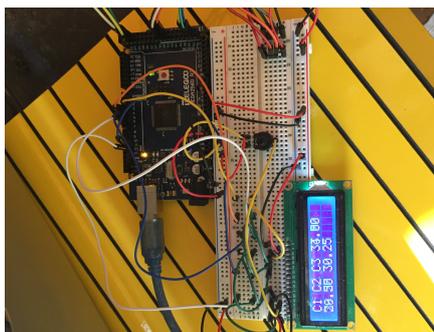


Figura 4.2: Circuito eletrônico montado para aquisição de dados, onde pode-se ver a placa Elegoo Mega2550 em azul e o display lcd.



Figura 4.3: Estrutura montada mostrando a lã de vidro englobando o duto de exaustão e o duto de cobre atravessando o mesmo.



Figura 4.4: Saída de água do duto de cobre e a balança com o balde em cima para medição da vazão mássica.

## 4.2

### Precauções

Os seguintes cuidados foram tomados para a realização do experimento.

1. Como todo projeto de engenharia é feito para funcionar até nas piores condições possíveis, esse projeto não seria diferente. Para este, um dos piores cenários seria se a areia e o duto de exaustão perdessem calor para o meio externo. Isso é ruim pois esse calor perdido seria um calor desperdiçado. Logo, seria como se investimento feito para aquecer a areia não fosse inteiramente aproveitado.

Quanto maior for a diferença de temperatura entre a areia e o meio externo, maior a tendência de ocorrer essa troca de calor não desejada. Como a areia será aquecida a uma temperatura elevada, para aumentar esse  $\Delta T$  basta diminuir ao máximo a temperatura externa. Lembrando que em uma aplicação real os reservatórios ficariam expostos ao meio ambiente e visando simular condições reais de trabalho, a experiência

foi realizada de madrugada ao ar livre, para que se tenha a menor temperatura ambiente possível.

2. Para que se possa alcançar o objetivo do experimento é preciso que medições sejam feitas, por isso a utilização dos termopares, da balança e da câmera filmadora. Todo processo de aquisição de dados, inclui o processo de transmissão de sinais, os quais podem sofrer ruídos. Tais ruídos podem causar distorções enormes no sinal medido.

A fim de evitar a presença de ruído externo, os roteadores de wi-fi foram desligados. Além disso, todos aparelhos eletrônicos, salvo os utilizados na experiência, foram desconectados da energia. Dessa maneira, espera-se reduzir a interferência de ondas externas ao sinal transmitido.

3. Como para alcançar o objetivo da experiência é preciso aquecer água por convecção utilizando areia, é necessário que evitar que ela seja aquecida por outras formas de troca de calor.

Para evitar que as paredes do duto de exaustão, as quais estão quentes, aquecem o tubo de cobre por condução, esse foi isolado do duto utilizando fibra de vidro com resina epoxi. Tal material é um excelente isolante térmico e aguenta temperaturas de até 300°C <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Valore retirado de Ribeiro, D. (2013), "Fibra de Vidro", WikiCiências

## 5 Modelagem matemática

As seguintes hipóteses foram feitas para o desenvolvimento matemático a seguir:

1. Regime Permanente
2. A correlação de Dittus-Boelter e de Gnielinski são válidas para o sistema
3. O coeficiente de fricção pode ser calculado pela correlação de Petukhov
4. Duto de exaustão é isolado termicamente
5. Todo calor liberado pela areia é absorvido pela água
6. A água somente é aquecida por convecção

### 5.1

#### Cálculo do coeficiente de troca de calor da areia

A figura 5.1, abaixo, ilustra o problema da transferência de calor.

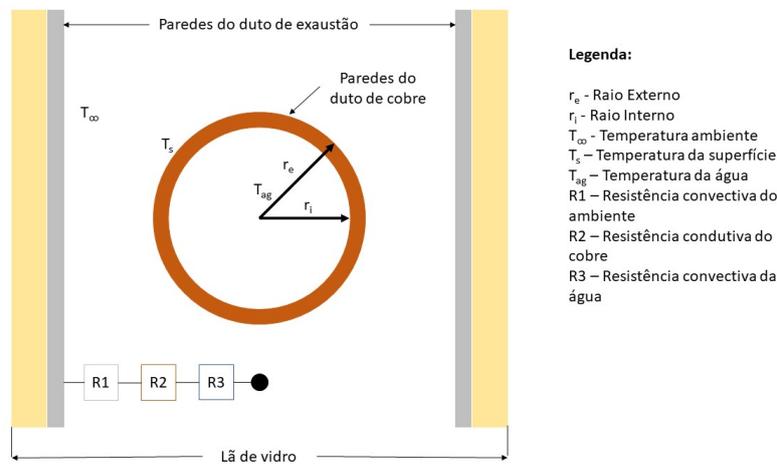


Figura 5.1: Esquema da vista de um corte transversal aos dutos

As resistências térmicas podem ser matematicamente expressas por:

$$R1 = \frac{1}{h_{areia} * 2 * \pi * r_e * L} \quad (5-1)$$

$$R2 = \frac{\ln(r_e/r_i)}{2 * \pi * k_c * L} \quad (5-2)$$

$$R3 = \frac{1}{h_{agua} * 2 * \pi * r_i * L} \quad (5-3)$$

Onde  $k_c$  é o coeficiente de condução do cobre;  $L$  representa o comprimento do tubo no qual ocorreu a troca de calor e  $h_{agua}$  é o coeficiente de troca de calor da água em um escoamento em regime permanente;  $r_e$  representa o raio externo do duto de cobre e  $r_i$  o raio interno do mesmo duto.

Sabe-se que o coeficiente global de troca pode ser relacionado com as resistências térmicas por:

$$UA = \frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{\frac{1}{2h_{areia}\pi r_e L} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{2h_{agua}\pi r_i L}} \quad (5-4)$$

E assim, o calor pode ser escrito da seguinte forma:

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T = U * A * (T_\infty - T_{ag}) \quad (5-5)$$

Sendo que nesse caso  $T_{ag}$  será considerada como a temperatura média entre as temperaturas entrada e saída da água, respectivamente. Logo,

$$T_{ag} = \frac{\bar{T}_{frio} + \bar{T}_{sada}}{2} \quad (5-6)$$

Além disso, o fluxo calor absorvido pela água é sabido. Pois, sabe-se a vazão,  $\dot{m}_{agua}$ , o calor específico da água,  $cp_{agua}$ , e as temperaturas quente e fria, ou seja, o  $\Delta T_{agua}$ . Logo, utilizando  $\dot{Q} = \dot{m} * cp * \Delta T$  descobre-se, sem grandes esforços, o fluxo de calor absorvido pela água.

Para determinar o número de Nusselt ( $N_u$ ) foram utilizadas duas relações diferentes para fins de comparação: Dittus-Boelter e Gnielinski (o fator de atrito calculado pela relação de Petukhov).

Sendo,

$$h_{agua} = \frac{\kappa_{agua}}{D_h} * N_u \quad (5-7)$$

$$Re = \frac{\rho * \nu * D_h}{\mu} \quad (5-8)$$

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{\kappa_{agua}} \quad (5-9)$$

- Dittus-Boelter

$$N_u = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad (5-10)$$

- Gnielinski e Petukhov

$$N_u = \frac{(f/8) * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12.7 * \sqrt{(f/8)} * (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5-11)$$

$$f = (0.79 * \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (5-12)$$

onde  $\kappa_{agua}$  é a condutividade da água;  $N_u$  é o número de Nusselt;  $D_h$  representa o diâmetro hidráulico;  $Re$  é o número de Reynolds;  $\rho$  a densidade do fluido;  $\nu$  a velocidade do fluido no escoamento;  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido;  $Pr$  é o número de Prandtl  $f$  é o fator de atrito do escoamento.

Dessa maneira, a única incógnita do problema é  $h_{areia}$ :

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_{agua} * cp * \Delta T_{agua} = U * A * (T_{\infty} - T_{ag}) \\ &= \frac{T_{\infty} - T_{ag}}{R1 + R2 + R3} \\ &= \frac{T_{\infty} - T_{ag}}{\frac{1}{2h_{areia}\pi r_e L} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{2h_{agua}\pi r_i L}} \end{aligned} \quad (5-13)$$

## 5.2

### Análise de Incertezas

Nenhuma medida está inteiramente completa sem a sua associação ao seu possível erro. Por isso que neste relatório, foi feito uma análise de incerteza.

Existem dois tipos de incerteza: tipo A que se relaciona com erros na medição; tipo B que se relaciona com os instrumentos utilizados.

#### – Tipo A ( $\mu_a$ )

Incerteza do tipo A é baseada na distribuição estatística da amostra. Esse tipo de incerteza foi calculado dividindo o desvio padrão pela raiz quadrada do número de amostras.

$$\mu_a = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (5-14)$$

#### – Tipo B ( $\mu_b$ )

Incertezas do tipo B se relacionam com qualquer outro meio que não seja a estatística, como por exemplo informação prévia do fabricante, modelos matemáticos e instrumentos utilizados.

Nessa experiência, considerando a resolução do instrumentos utilizados como sendo  $res$ , pode-se assumir uma distribuição retangular com limites  $\pm res/2$ , pois não há razão para atribuir uma probabilidade diferenciada para regiões dentro desse intervalo. Logo a incerteza padrão desse tipo pode ser calculada como:

$$\mu_b = \frac{res}{\sqrt{12}} \quad (5-15)$$

onde  $res$  representa a resolução do instrumento utilizado.

Assim foi possível calcular a incerteza padrão combinada ( $\mu_{comb}$ ), pela seguinte equação:

$$\mu_{comb} = \sqrt{\sum \frac{\partial h_{areia}}{\partial x_i}^2 * [(\mu_{a_{xi}})^2 + (\mu_{b_{xi}})^2]} \quad (5-16)$$

onde  $x_i$  representa as propriedades medidas durante a experiência.

Considerando que a distribuição de probabilidades do resultado será aproximadamente Gaussiana (t-Student), estima-se o número de graus de liberdade efetivo associado à incerteza padrão combinada calculada para então determinar o fator de abrangência ( $\kappa$ ). Utiliza-se a fórmula de Welch-Satterhwaite:

$$GL_{ef} = \frac{\mu_{comb}^4}{\sum \frac{(\partial h_{areia} / \partial x_i * \mu_a)^4}{GL_i}} \quad (5-17)$$

Arredondando o valor de  $GL_{ef}$  para o inteiro superior pode-se estimar o número de graus de liberdade. Assim, pode-se utilizar esse número como entrada em uma tabela t-Student para uma confiabilidade escolhida (aqui foi escolhido 95%) e determinar o fator de abrangência para essa confiabilidade.

Sendo assim, calcula-se a incerteza associada como sendo:

$$\mu = \kappa * \mu_{comb} \quad (5-18)$$

Esse processo é repetido para cada um dos parâmetros a seguir:

$$\begin{aligned} R2 &= \frac{\ln(r_e/r_i)}{2 * \pi * k_c * L} \\ R3 &= \frac{1}{h_{agua} * 2 * \pi * r_i * L} \\ \dot{Q} &= \dot{m}_{agua} * cp * \Delta T_{agua} \\ T &= T_\infty - T_{ag} \end{aligned}$$

Uma vez que cada uma das incertezas de R2, R3,  $\dot{Q}$  e T são calculadas, elas podem ser utilizadas para calcular a incerteza do  $h_{areia}$ . Tal coeficiente se relaciona com os parâmetros mencionados pela seguinte equação:

$$h_{areia} = (\pi * 2 * r_e * L * (\frac{T}{\dot{Q}} - R2 - R3))^{-1} \quad (5-19)$$

## 6

### Resultados

#### 6.1

##### Valores utilizados

Na tabela abaixo pode-se ver os valores utilizados para a realização dos cálculos:

Tabela 6.1: Lista de valores utilizados

Parâmetros	Simbologia	Valor	Unidade
Diâmetro externo do duto de cobre	dex	9.41e-3	m
Diâmetro interno do duto de cobre	din	8.41e-3	m
Comprimento da área de troca de calor	L	0.081	m
Coefficiente de condução do cobre	$k_c$	370 [3]	W/mK
Espessura da lâ de vidro	tla	0.012	m
Diâmetro externo da lâ de vidro	dla	0.105	m
Coefficiente de condução da lâ de vidro	kla	0.04 [13]	W/mK
Densidade da água	$\rho_{agua}$	993.9 [15]	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade da água	$\mu$	0.7255e-3 [10]	kg/ms
Calor específico a pressão constante	$c_{p_{agua}}$	4178[12]	J/kgK
Coefficiente de condução da água	$k_{agua}$	0.6246 [14]	W/mK

#### 6.2

##### Comprovação das hipóteses

Aqui as hipóteses feitas serão comprovadas para que se possa utilizar o modelo matemático apresentado:

- Hipótese 1

Para comprovar que o sistema ficou em regime permanente serão apresentados os gráficos de todas medições feitas na experiência.

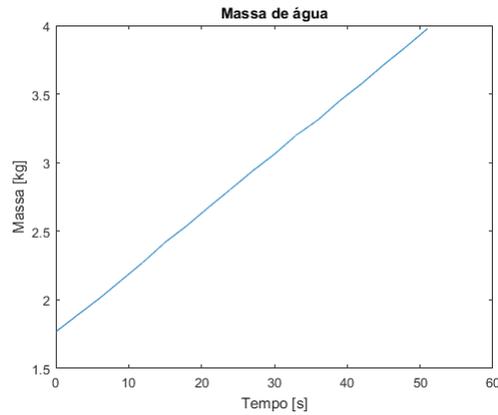


Figura 6.1: Gráfico da massa de água vs. Tempo

Pela fig 6.1 percebe-se que o crescimento da massa de água no balde é linear. Logo, ele é constante no tempo. Como a vazão mássica é justamente a variação de massa no tempo, se a variação mássica é constante, a vazão mássica também é constante.

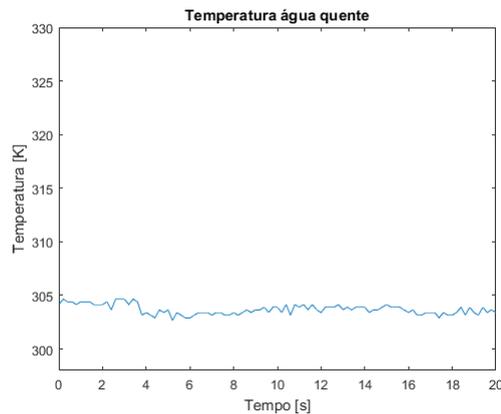


Figura 6.2: Gráfico da temperatura de saída da água vs. Tempo

Pelo gráfico representado pela fig 6.2, o qual representa a temperatura da água aquecida com o tempo. Essa curva tem seu valor máximo em  $T_{quente_{max}} = 304.65K$  e seu mínimo em  $T_{quente_{min}} = 302.65K$ . Logo, a temperatura de saída da água foi mantida numa faixa de temperatura com amplitude de  $2K$ . Assim, pode-se assumir que sua temperatura de saída não sofreu uma variação significativa o suficiente para que o regime seja considerado transiente.

A figura 6.3 apresenta o gráfico da temperatura da água proveniente do tanque frio. A mesma análise feita para a temperatura da água aquecida será feita aqui. A curva tem seu valor máximo em  $T_{frio_{max}} = 301.4K$  e seu mínimo em  $T_{frio_{min}} = 300.4K$ . Logo, a temperatura de entrada da água foi mantida numa faixa de temperatura com amplitude de  $1K$ .

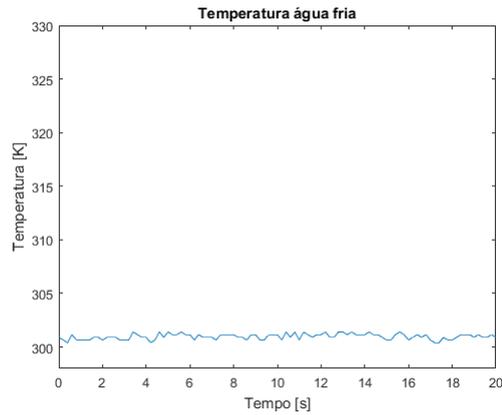


Figura 6.3: Gráfico da temperatura de entrada da água vs. Tempo

Mostrando ,assim, que a hipótese de regime permanente para essa medida é aceitável.

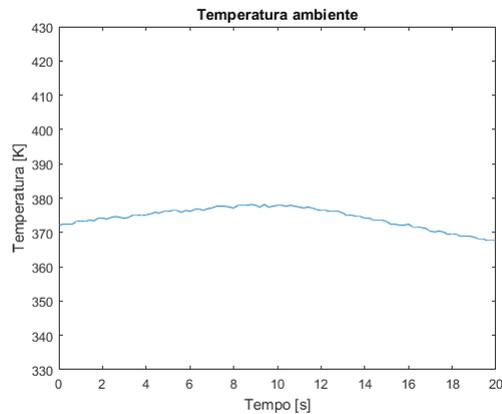


Figura 6.4: Gráfico da temperatura do fluido vs. Tempo

Pelo gráfico da temperatura ambiente, apresentado na figura 6.4, pode-se perceber que houve uma variação maior do que nas outras curvas apresentadas. Essa temperatura era controlada pelo escoamento da areia, e visto que quando se trabalha com grandes quantidades desse sólido é problemático atingir uma temperatura homogênea em toda as partículas, esperava-se uma maior amplitude nesta temperatura. O valor máximo foi observado em  $T_{\infty_{max}} = 378.15K$  e  $T_{\infty_{min}} = 367.65K$ . Sendo assim, a amplitude da faixa de trabalho foi  $10.5K$ . Essa se apresenta como uma variação que pode ser considerável, mas para fins deste projeto, admitiu-se que essa propriedade está em regime permanente.

– Hipótese 2

Para que a correlação de Dittus-Boelter seja válida três condições preci-

serem satisfeitas:

$$\begin{aligned} 10000 < Re < 12000 \\ 0.7 < Pr < 120 \\ \frac{L_{eq}}{D} \geq 10 \end{aligned}$$

Já a correlação de Gnielinski possui outras condições:

$$\begin{aligned} 3000 \leq Re \leq 5000000 \\ 0.5 \leq Pr \leq 2000 \end{aligned}$$

Ou seja, existem restrições para os números de Reynolds e de Prandtl em ambas correlações. No caso de Dittus-Boelter existe uma terceira para razão entre o comprimento de tubo antes da área de troca de calor e o diâmetro do tubo.

Como os valores encontrados foram:

$$\begin{aligned} Re &= 10104.51 \\ Pr &= 4.85 \\ \frac{L_{eq}}{D} &= 212.39 \end{aligned}$$

ambas correlações são válidas para o sistema.

– Hipótese 3

Para garantir que a relação de Petukhov é válida é necessário garantir que a superfície do duto é lisa. Como o tubo utilizado é feito de cobre, pode-se considerar que sua superfície é lisa.

– Hipótese 4

Para provar que a lã de vidro foi eficiente em isolar termicamente o duto de exaustão, foi calculada potência perdida por condução para o meio externo. Assumindo uma estimativa conservadora em que o meio externo estava a 20°C o resultado obtido foi:

$$\dot{Q}_{perdido} = UA\Delta T = \frac{T_{interno} - T_{externo}}{R_{la}} = \frac{T_{interno} - T_{externo}}{\frac{\ln(d_{la}/(d_{la}-2t_{la}))}{2\pi * k_{la} * l}} = 0.89 \text{ W}$$

Enquanto que a potência absorvida pela água foi:

$$\dot{Q}_{\text{agua}} = 490.49 \text{ W}$$

Logo, menos de 0.2% da potência térmica fornecida foi perdida. Sendo assim, pode-se considerar que a lã de vidro foi eficaz em isolar termicamente o duto de exaustão.

– Hipótese 5

A areia poderia ter fornecido calor para água, duto de cobre, meio interno e externo.

Pelo gráfico da temperatura ambiente dentro do duto de exaustão, fig 6.4, percebe-se que ela não varia muito, se comparado com o fato de que a mesma temperatura começou a experiência na temperatura ambiente. Logo assumi-se que a areia não forneceu calor para esse meio.

No item anterior foi provado que o calor perdido para o meio externo é desprezível.

Pode-se assumir que o duto de cobre não absorve calor, pois a energia absorvida por ele é diretamente proporcional a sua massa, a qual é muito pequena quando comparada a massa de água e areia utilizada. Por esse motivo, assumi-se que o duto de cobre não absorve calor.

– Hipótese 6

A precaução número 3 garante essa hipótese.

### 6.3

#### Cálculo dos coeficientes de troca térmica

Uma vez que as hipóteses foram confirmadas, pode-se calcular o número de Nusselt, para então calcular o coeficiente de troca térmica da água. Em seguida, calculou-se o coeficiente de troca térmica da areia.

Para o número de Nusselt:

- Dittus-Boelter

$$Nu_{db} = 69.14$$

- Petukhov e Gnielinski

$$f = 0.0031$$

$$Nu_{gn} = 69.77$$

Como ambos valores para o número de Nusselt foram muito próximos, percebe-se que ambas correlações podem ser aplicadas nessa situação. Assim, foi utilizada a media entre os dois valores encontrados. Uma vez que sabe-se o número de Nusselt pode-se calcular  $h_{agua}$  pela eq 5-7. Obtendo-se os seguintes valores:

$$Nu = 69.45$$

$$h_{agua} = 5154.27W/m^2K$$

E por fim, pela eq 5-13, calcula-se  $h_{areia}$ :

$$h_{areia} = 7428.63W/m^2K$$

#### 6.4

##### Incerteza do cálculo

Os valores encontrados para as incertezas dos parâmetros mencionados foram:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{R2}}{R2} &= 3.57\% \\ \frac{\delta_{R3}}{R3} &= 0.005\% \\ \frac{\delta_{\dot{Q}}}{\dot{Q}} &= 9\% \\ \frac{\delta_t}{T} &= 0.86\% \end{aligned}$$

(6-1)

E os coeficientes de sensibilidade calculados foram:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_{areia}}{\partial r_e} * \frac{1}{h_{areia}} &= -106.195 \\ \frac{\partial h_{areia}}{\partial R2} * \frac{1}{h_{areia}} &= 4.94 \\ \frac{\partial h_{areia}}{\partial R3} * \frac{1}{h_{areia}} &= 4.94 \\ \frac{\partial h_{areia}}{\partial \dot{Q}} * \frac{1}{h_{areia}} &= 0.003 \\ \frac{\partial h_{areia}}{\partial T} * \frac{1}{h_{areia}} &= -0.01 \end{aligned}$$

Pelos valores apresentados percebe-se que a maior parte do erro é devida a medição do diâmetro do duto de cobre.

Isso pode ser causado pelo instrumento utilizado, no caso o instrumento foi um paquímetro com resolução  $res = 0.05mm$ . Logo, existe um erro associado a essa, relativamente, alta resolução dele. Outras causas seriam erros de leitura do instrumentador, deformações ao longo do duto que causem leituras diferentes para uma mesma medida.

Assim, foi possível calcular a incerteza associada ao coeficiente de troca térmica da areia.

$$u = 13.11\% = 974.24W/m^2K$$

Portanto,

$$h_{areia} = 7428.62 \pm 974.24W/m^2K$$

## 7

### Conclusão

Após realizar a experiência e terminar os cálculos necessários foi possível chegar a algumas conclusões.

Comparando o valor encontrado para o coeficiente de troca térmica da areia nessa situação com os valores apresentados na tabela 1.1 percebe-se que para fins de troca de calor por convecção a areia se apresenta como um material melhor do que a água e o ar em convecção natural, melhor do que o ar em convecção forçada e dependendo da situação ela pode ser melhor do que água em convecção forçada e em ebulição.

Porém, ela não apresenta uma vantagem quando comparada com convecção forçada de outras partículas sólidas.

## Referências Bibliográficas

- [1] *Ministério de Minas e Energia. Balanço energético Nacional*, <https://ben.epe.goc.br/>, 2017.
- [2] Borgnakke, Sonntag, “*Fundamentos da Termodinâmica 8ª edição*”, Edgard Blucher Ltda, 2013.
- [3] W. Braga Filho, “*Transmissão de calor*”, Thomson Learning, 2004.
- [4] F. Incropera, D. DeWitt “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer 4ª edição*”, Wiley.
- [5] Energy Storage Association, <http://energystorage.org/energy-storage/storage-technology-comparisons/thermal2>.
- [6] Energia Heliotérmica, <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/glossario/armazenamento-termico>.
- [7] Andrew Willians, “*Sand: CSP energy storage solution of the future?*”, New Energy Update.
- [8] City o Massachusetts, “*State of Charge*”, Massachusetts Energy Storage Initiative Study, 2016.
- [9] California Independent System Operator, California Public Utilities Commission, California Energy, “*Advancing and maximizing the value of Energy Storage Technology A California Roadmap*”, California ISO, 2016 Commission.
- [10] UPM/EE/DEM& DEE/FT-I-3E, “*Apêndice E ? Algumas Propriedades de Fluidos*”, [http://meusite.mackenzie.com.br/miriamtg/portfolio\\_FT\\_I/portfolio\\_FT\\_I\\_ap\\_E.pdf](http://meusite.mackenzie.com.br/miriamtg/portfolio_FT_I/portfolio_FT_I_ap_E.pdf), 2004
- [11] OMEGA, “*Revised Thermocouple Reference Tables*”
- [12] The Engineering Toolbox, “*Specific Heat of common Substances*”, [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_391.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html)
- [13] PROTOLAB - Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação, “*Tabela de Condutividade Térmica de materiais de construção*”
- [14] Young, Hugh D., *University Physics, 7th Ed.*, Table 15-5.

- [15] [https://pt.wikipedia.org/wiki/Propriedades\\_f%C3%ADsico-qu%C3%ADmicas\\_da\\_%C3%A1gua#Densidade\\_da\\_.C3.A1gua\\_e\\_do\\_gelo](https://pt.wikipedia.org/wiki/Propriedades_f%C3%ADsico-qu%C3%ADmicas_da_%C3%A1gua#Densidade_da_.C3.A1gua_e_do_gelo)
- [16] BENOIT, H., L. SPREAFICO, D. GAUTHIER AND G. FLAMANT, *Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients. Renewable and Sustainable Energy Reviews.*