

### **3. Abordagem Experimental**

Neste capítulo são descritos os parâmetros a serem estudados, apresenta-se a bancada de testes e descreve-se, em detalhes, o procedimento experimental.

#### **3.1. Parâmetros estudados**

Realizaram-se experiências com o trocador de calor de placas, com um número fixo de 16 placas, com 8 passos para a pasta de gelo, para uma solução de propileno glicol – água com concentração inicial de entrada de 13,8% em massa. O segundo fluido foi sempre água, em temperaturas superiores às da pasta de gelo. Para o calor absorvido pela pasta de gelo adota-se o termo “capacidade de resfriamento”, que é dependente das condições específicas de cada teste. Do outro lado, denomina-se por “carga térmica” o calor cedido pela água.

Trabalhou-se com frações de gelo de 0,11 e 0,14 na entrada do trocador, com vazões de pasta de gelo na faixa de 0,10 a 0,23 kg/s. No que diz respeito à carga térmica foi variada a temperatura inicial de entrada, com os seguintes valores: 25,0, 27,5 e 32,5°C, bem como as vazões mássicas da água, entre 0,128 e 0,215kg/s. Condições de troca de calor em paralelo e contra-corrente foram empregadas para todos os casos mencionados.

Com as entalpias e vazões dos fluidos determina-se o calor trocado em ambos os lados do trocador. A carga térmica é então comparada à capacidade de resfriamento da pasta de gelo, que depende, entre outros, da fração inicial de gelo. Com o calor trocado, as temperaturas e os dados da geometria do trocador de calor, obtêm-se o coeficiente global de troca de calor.

Da diferença de pressões obtidas na entrada e saída do trocador pode-se obter o fator de atrito para cada condição de vazão e fração de gelo na entrada.

Finalmente encontram-se correlações adimensionais relacionando os números de Reynolds, Prandtl, Nusselt e o fator de atrito, para representar o comportamento da pasta de gelo, no que tange à troca de calor e perda de carga.

### 3.2. Modelo Experimental

A bancada experimental de teste, para o presente estudo do coeficiente global de troca de calor e queda de pressão, foi montada no Laboratório de Refrigeração e Aquecimento da PUC-Rio e consta, basicamente, das seguintes partes: uma seção de teste, um sistema para a pasta de gelo, um sistema de carga térmica e um sistema de aquisição de dados.

Na figura 11 pode-se apreciar uma visão esquemática da bancada de testes. Na parte superior esquerda observa-se o sistema de carga térmica. A seção de testes é composta pelo trocador de calor em si. Na zona direita encontra-se o sistema para a pasta de gelo.

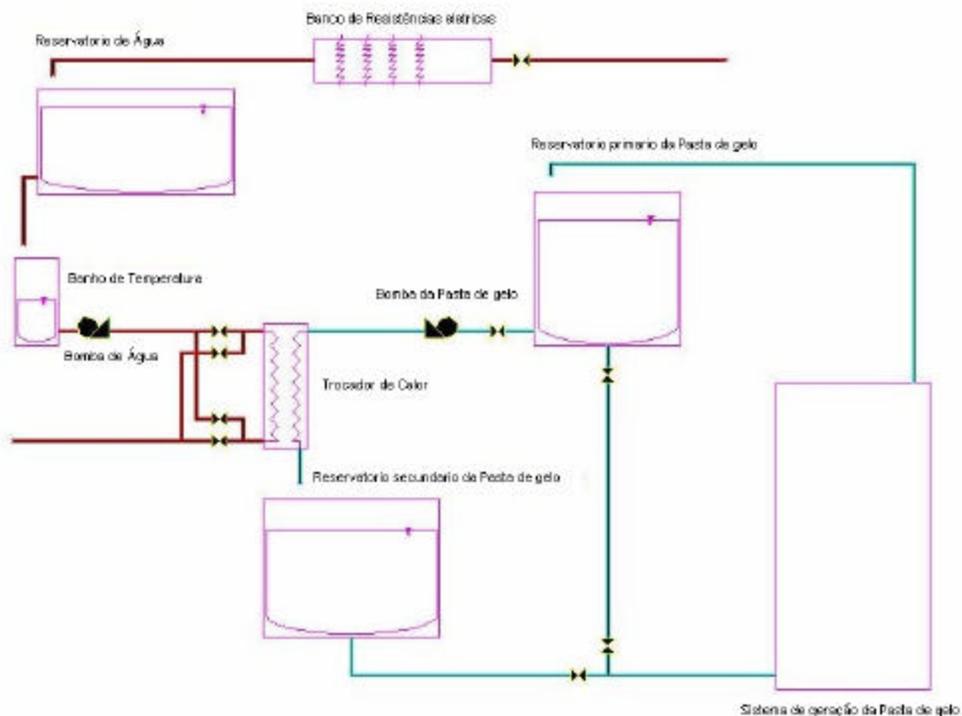


Figura 11 – Esquema da bancada experimental.

A seção de testes é, na prática, o trocador de calor de placas, onde se coletam os dados fundamentais para a presente pesquisa.

O sistema para a pasta de gelo é composto por um sistema de geração de pasta de gelo da York Brasil, tipo FI-200TVLL-3, um reservatório primário, uma bomba, a linha de escamento até o trocador de calor e seu retorno e um tanque de armazenamento secundário que armazena a pasta de gelo após de sua passagem pelo trocador de calor.

O sistema de carga térmica é composto por um banco de resistências elétricas, um reservatório de água, um banho de temperatura constante e uma bomba.

Finalmente, o sistema de aquisição de dados é formado por um chassi Agilent, que coleta e trata os sinais dos transdutores, conectado a um computador, que armazena as informações para posterior análise. Como parte deste sistema destaca-se o calorímetro responsável pela análise das frações de gelo de cada amostra de pasta de gelo que se analisa durante as experiências.

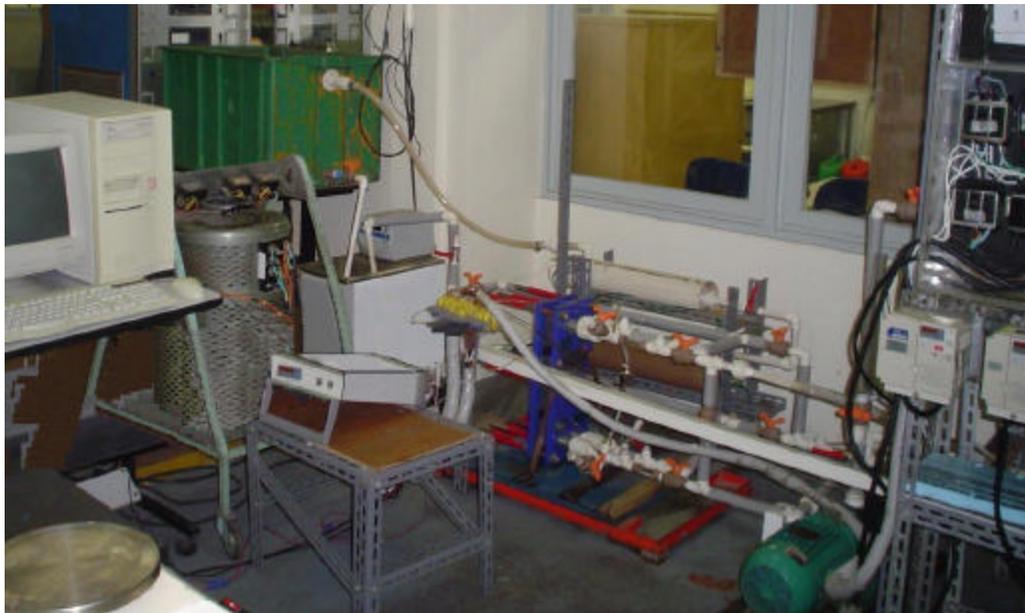


Figura 12 – Bancada de testes no laboratório.

### 3.2.1. Seção de testes

As características do trocador de calor de placas, e o arranjo do mesmo, utilizado para a presente experiência, são os seguintes:

- Modelo : Placas
- Marca : Alfa Laval
- Número de placas : 16
- Material das placas : AISI 316
- Arranjo de placas : Paralelo tipo U,  
(1x7/1x8)
- Placas : Formato chevron,  
do tipo H.



Figura 13 – Trocador de calor a placas da Alfa laval.

Para os testes dispôs-se de um arranjo de placas no qual se divide o fluxo para múltiplas passagens únicas de cada fluido no trocador, segundo se pode observar na figura 14.

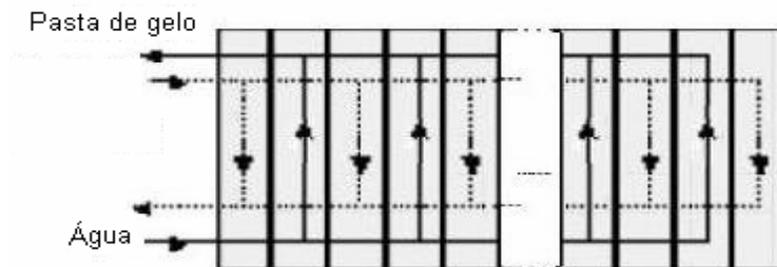


Figura 14 – Arranjo em Paralelo, tipo U.

Dispôs-se de termopares do tipo K, nas entradas e saídas para cada linha de fluxo no trocador de calor, para poder fazer os cálculos da carga térmica e a capacidade de resfriamento. De maneira similar foram colocados termopares nos canais formados entre placa e placa.

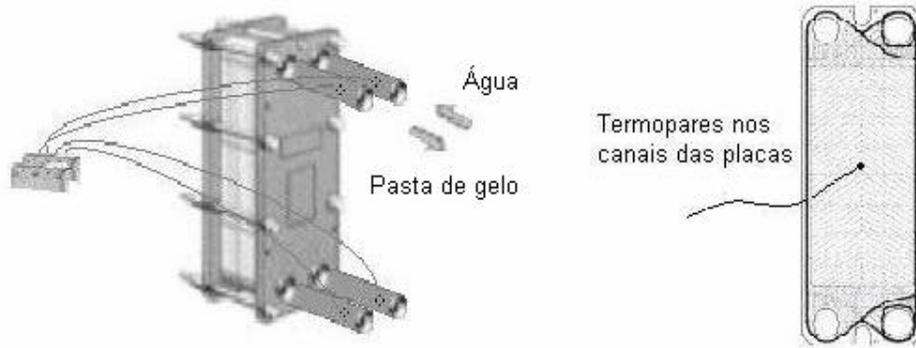


Figura 15 – Termopares nas entradas, e canais do trocador.

Para a determinação da queda de pressão, mede-se diretamente a diferença entre as pressões na entrada e saída do trocador com o auxílio de um transdutor de pressão diferencial. Este precisa de uma alimentação em alta frequência proveniente de um demodulador. O sinal é adquirido através do sistema de aquisição, controlado pelo computador.

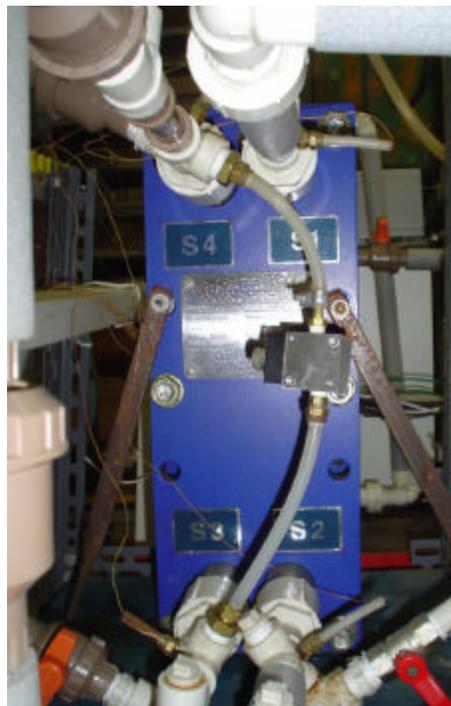


Figura 16 – Transdutor de pressão diferencial.

Para a determinação da capacidade de resfriamento da pasta de gelo necessita-se, entre outros dados, da fração de gelo. A fração de gelo é determinada na entrada e saída das linhas da pasta de gelo, para cada experiência.

Pelo método do calorímetro, a cada amostra de pasta de gelo se fornece uma determinada potência por um determinado intervalo de tempo. Monitoram-se a potência e a temperatura durante o processo, como já descrito anteriormente.

O calorímetro é basicamente um reservatório termicamente isolado. Possui uma resistência elétrica de 150W, um agitador acionado por um pequeno motor elétrico e um termopar.

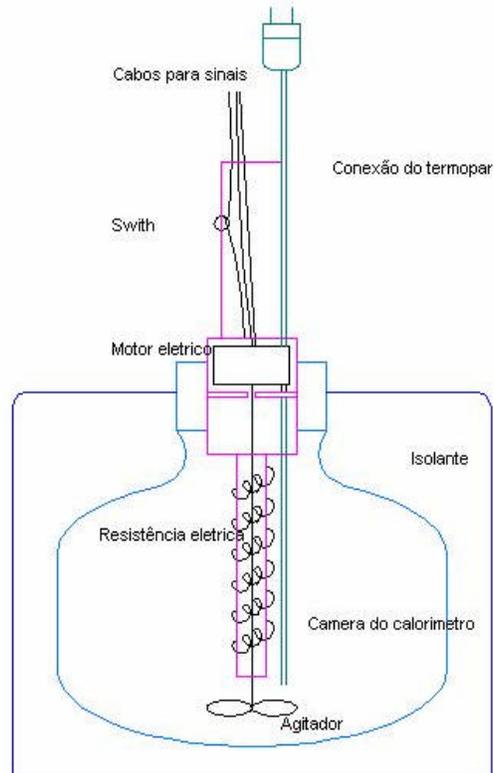


Figura 17 – Esquema do calorímetro e suas partes.

Os sinais de amperagem, voltagem e temperatura são adquiridos durante todo o tempo de fornecimento de energia, para cada amostra de pasta de gelo.

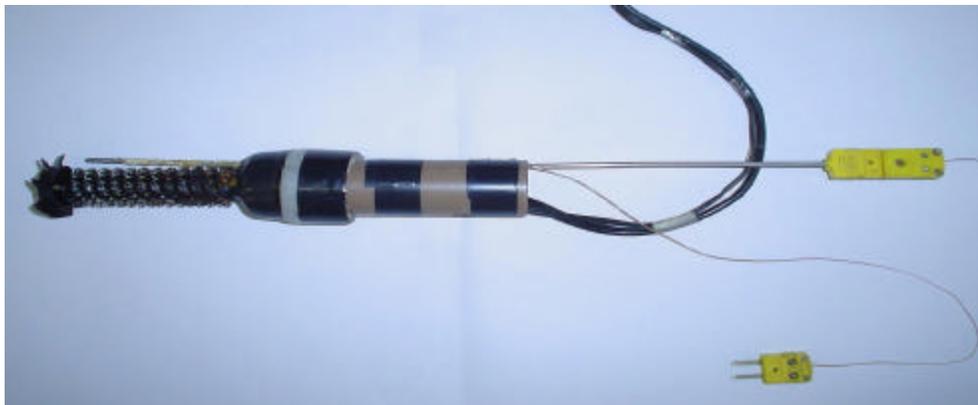


Figura 18 – Conjunto agitador, resistência, e termopar.

### 3.2.2. Sistema para a pasta de gelo

O sistema de geração de pasta de gelo (da York Brasil) é baseado num evaporador tipo tubo-carcaça, com raspador helicoidal para a geração da pasta de gelo, sistema este que faz parte de um ciclo de refrigeração. O sistema de refrigeração trabalha com R-22.

Na figura 19, pode-se observar o equipamento de refrigeração da York Brasil, tipo FI-200TVLL-3, que funcionou como sistema primário de refrigeração.



Figura 19 – Sistema de geração de Pasta de Gelo, da York.

Tem-se um reservatório primário com uma capacidade de 220L onde fica armazenada a pasta de gelo. Tem-se instalado na parte superior do reservatório um motor elétrico que aciona um agitador mecânico dentro do tanque, com o objetivo de manter sempre homogênea a concentração da pasta de gelo. No interior do tanque foi instalada uma seqüência vertical de termopares próximos à parede, para

o monitoramento do campo de temperaturas durante o processo de geração da pasta de gelo.

A geração da pasta de gelo é dinâmica. Transfere-se toda a pasta de gelo do reservatório secundário, com capacidade de 300 litros, por meio da bomba do mesmo sistema de geração, ao tanque primário. Inunda-se o interior do evaporador com a solução aquosa, para logo se acionar o sistema de frio.

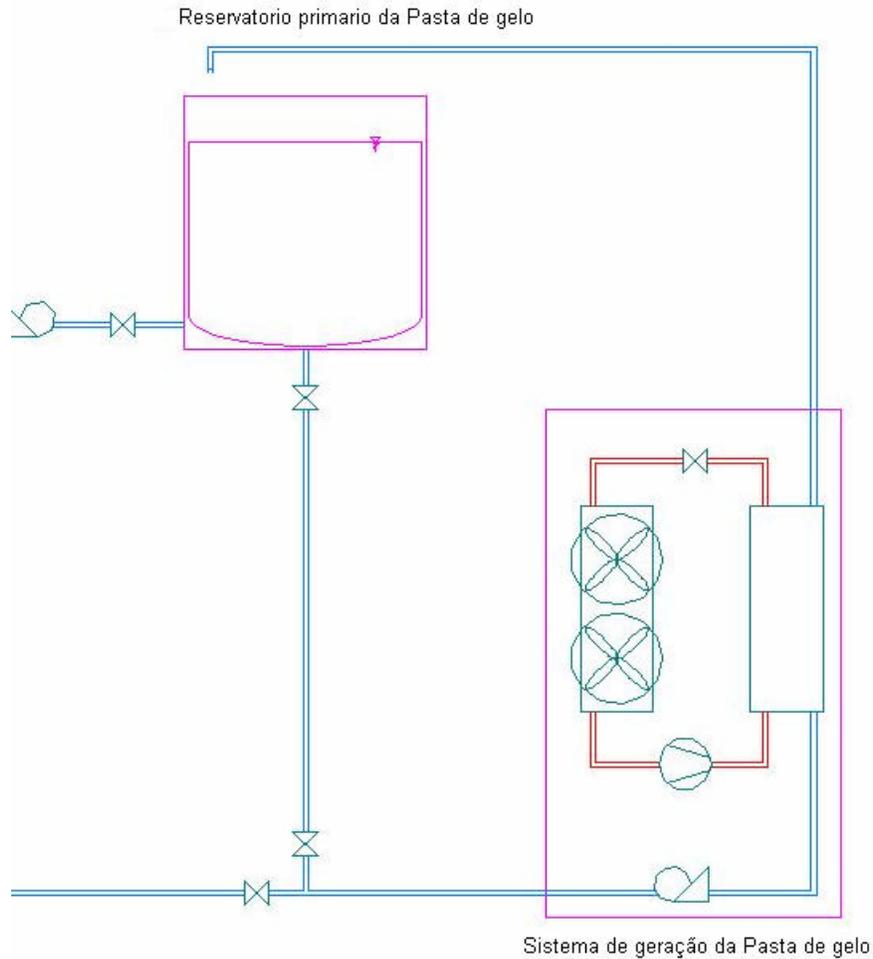


Figura 20 – Esquema do circuito de geração da pasta de gelo.

Após a geração, nas condições pré-estabelecidas, a pasta de gelo gerada fica armazenada no tanque primário, sob agitação, visando manter a homogeneidade e aglomeração de cristais. A bomba instalada na linha leva, então, a mistura ao trocador de calor, e é, em seguida, direcionada ao tanque de armazenamento secundário.

Na figura 21, é apresentado o tanque primário que armazena a pasta de gelo gerada. Na parte superior pode-se observar o motor elétrico que aciona o agitador no interior do tanque para manter homogênea a solução. Já na parte dianteira se encontra o painel elétrico de controle para as bombas e os bancos de resistências.



Figura 21 – Tanque de armazenamento primário.

A vazão da pasta de gelo dependerá das revoluções do eixo da bomba da mesma. Por meio de um inversor de frequência, figura 22, pode-se impor diferentes vazões para os diferentes testes.



Figura 22 - Inversor de frequência, e Bomba da pasta de gelo.

### 3.2.3. Sistema de carga térmica

A condição inicial de temperatura de entrada para a água é obtida com a ajuda do sistema de carga térmica, composto, entre outros, por um banco de resistências elétricas, com uma potência instalada de 10kW. Um potenciômetro de 220/220VAC regula a variação de voltagem, que controla uma das resistências elétricas, para assim poder garantir uma temperatura inicial para a água armazenada no reservatório.

O reservatório intermediário de água, com uma capacidade de 160 litros, serve como acumulador, evitando a variação brusca da temperatura de entrada na linha de água. Ao sair do reservatório a água passa através de um banho de temperatura controlada, NESLAB modelo RTE 17, com uma potência de refrigeração de 700W a 0°C (com controle PID e uma precisão de 0,05°C), regulando, assim, a temperatura de entrada na linha da água ao trocador de calor.



Figura 23 – Potenciômetro, e Banho de temperatura da NESLAB.

Na linha de entrada ao trocador tem-se o “manifold” que permite situações de troca de calor em paralelo e em contra-corrente mudando a direção da água. Na linha de saída da água do trocador tem-se uma válvula de agulha como restrição, para controlar e permitir diferentes vazões da água.

### 3.2.4. Sistema de Aquisição de dados

Finalmente, um sistema de aquisição de dados da marca Agilent, modelo 34970A, envia os sinais dos termopares e do transdutor de pressão para o computador. Um programa no computador armazena os dados para o cálculo da carga térmica e a potência de resfriamento, assim como da perda de carga. Os sinais provenientes do calorímetro, durante as análises das amostras de pasta de gelo, também são armazenados pelo sistema de aquisição de dados, para os cálculos das frações de gelo.



Figura 24 - Sistema de aquisição de dados, e Calorímetro.

### **3.3. Procedimento experimental**

O sistema de aquisição de dados funciona continuamente, seja como elemento de controle até atingir as condições desejadas, ou para a aquisição de dados como temperaturas, diferencial de pressões e sinais de voltagem e amperagem, para posterior análise.

Numa primeira etapa, para a geração da pasta de gelo, inicialmente inunda-se o evaporador do sistema de geração com a mistura de propileno glicol – água do reservatório secundário, com ajuda da bomba do sistema de refrigeração. Aciona-se, então, o sistema de refrigeração, gerando pasta de gelo de forma contínua no reservatório primário, controlando as temperaturas no tanque até atingir uma condição adequada para garantir certa fração de gelo no reservatório. Nos testes estabeleceram-se temperaturas de  $-4,7$  e  $-5,2^{\circ}\text{C}$  para atingir a fração de gelo desejada. Esta primeira etapa leva um pouco mais de uma hora, em média. A pasta de gelo é constantemente homogeneizada pelo agitador mecânico interno dentro do tanque, acionado por um motor elétrico de revoluções controladas pelo inversor de frequência no painel de controle.

Antes de encerrar a primeira etapa, começa-se a condicionar a carga térmica para uma vazão constante de água. Com ajuda dos bancos de resistências elétricas e o potenciômetro, fixa-se uma temperatura no tanque de água. Liga-se a bomba e fixa-se uma vazão de água com ajuda da válvula de agulha que se encontra na linha de descarga. O banho térmico de temperatura constante dará o ajuste final à temperatura de entrada da água. Aguarda-se o regime permanente para iniciar a aquisição de dados dos testes.

Após conseguir condições estáveis nas duas primeiras etapas, põe-se em marcha a bomba para a pasta de gelo, fixa-se uma vazão de pasta de gelo com o inversor de frequência e espera-se, em média, uns 15 minutos até que se atinja o regime permanente.

Atingido o regime permanente, as medidas de temperatura e queda de pressão são registradas pelo computador. Paralelamente, são coletadas as amostras de pasta de gelo na entrada e na saída da linha, levando-se as mesmas ao calorímetro que se encontra ligado ao sistema de aquisição de dados.

Com ajuda do misturador agita-se a amostra no interior do calorímetro, liga-se a fonte de energia, fornecendo calor à amostra até alcançar, em média, uma temperatura de 8°C. Desliga-se a fonte e deixa-se homogeneizar, para se estabelecer uma temperatura final. Os sinais de temperatura, voltagem, corrente, no tempo, são adquiridos pelo sistema para posterior análise.

Repete-se a experiência mudando as condições de vazão da pasta de gelo no painel de controle com o inversor de frequências. Nos testes, a vazão da pasta de gelo variou de 0,10 a 0,23 kg/s.

Uma vez realizada a última experiência da série, desliga-se a bomba da pasta de gelo, fecha-se a válvula do reservatório primário da pasta de gelo, desligam-se os bancos de resistências elétricas, fecha-se o registro de água, deixando drenar a água ao esgoto, para logo depois desligar a bomba de água. Por fim, fecham-se as válvulas no trocador.

Nas experiências seguintes, se consideram todos os passos anteriores, considerando agora condições diferentes de temperatura de entrada da água e variando sua vazão mássica de 0,128 a 0,215 kg/s.