

Ana Lúcia Branco Emídio

Método Simplificado de Simulação dos Fenómenos de
Transferência de Calor e Massa numa Torre de Arrefecimento

Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor: Celestino Rodrigues Ruivo

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria sem o apoio de todos, por isso quero deixar aqui os meus agradecimentos a todos aqueles que me apoiaram e ajudaram para a conclusão da mesma.

Quero em primeiro lugar agradecer ao professor doutor Celestino Ruivo pela sua orientação, disponibilidade, paciência, apoio e pelos conhecimentos que me transmitiu ao longo deste trabalho.

Aos engenheiros Henrique e Carlos pela seu apoio e disponibilidade que me deram durante a realização dos ensaios na torre de arrefecimento.

Aos meus pais pela apoio e motivação que demonstraram ao longo desta jornada, sem eles nada disto era possível.

Resumo

O presente projeto tem como objetivo estudar os fenómenos de transferência de calor e massa entre um escoamento de água e ar numa torre de arrefecimento, construir um modelo numérico desses mesmos fenómenos.

O modelo numérico de simulação dos fenómenos de transferência de calor e massa, traduz a evolução das temperaturas de ambos os escoamentos (ar e água) ao longo da torre.

Na torre de arrefecimento em causa a água é pulverizada na parte superior da mesma de forma a uniformizar a distribuição da água por toda a torre, o ar é introduzido na parte inferior da torre forçadamente, por ação de um ventilador.

De forma a simular uma instalação industrial a água introduzida na torre é previamente aquecida num condensador.

O projeto é constituído por uma parte experimental e uma parte numérica. A parte experimental constitui na realização de um conjunto de ensaios numa torre de arrefecimento didática existente no Laboratório de Termodinâmica Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Algarve. Os ensaios a realizar tiveram condições de funcionamento distintas no que respeita aos caudais dos escoamentos de ar e água que atravessam a torre. Cada ensaio foi realizado até se atingir condições de funcionamento próximas do regime permanente.

A parte numérica do projeto consistiu no desenvolvimento de um modelo de simulações dos fenómenos de transferência que ocorrem na torre de arrefecimento. Para tal formulou-se o problema físico com base em algumas hipóteses de simulação, equações que regem os fenómenos de transferência nas condições de entrada e fronteira do problema em causa.

Palavras Chave: Torre de Arrefecimento, escoamento de água, escoamento de ar

Abstract

The goal of this project is to study the events of heat and mass transfer between a water flow and air flow of a cooling tower and to build a numerical model of those events.

The numerical model of simulation of the events of transfer of heat and mass, interprets the evolution of the temperatures of both flows throughout the tower.

On tower studied, water is pulverized above it to uniform the distribution of water through the entire tower and the air is forcefully intruded under the tower by a ventilator.

To simulate an industrial plant, the water introduced in the tower have been heated beforehand in a condenser.

The project is composed of an experimental parte and a numerical part. The experimental part concerns the execution of an array of tests in a didactic cooling tower that already exist in the Laboratory of Applied Thermodynamic of the Department of Mechanical Engineering of the University of Algarve. The tests were executed with distinct conditions of functioning concerning the flows of water and air that pass through the tower. The test were carried on until obtaining the functioning conditions nearing the permanent regime.

The numerical part of the project concerns the development of a simulation model of the transfers occurring in the cooling tower. To develop this model, the physical problem had to be formulated, based in some simulation hypothesis, with equations that conduct the transfer events and the previous conditions and the boundaries of the problem.

Keywords: coolins tower, flows of water, flows o air, characteristic parameter, permanente regime

Índice

Nomenclatura.....	1
Introdução.....	3
1. – Caracterização de uma torre de arrefecimento.....	5
1.1. – Transferência de calor e massa.....	5
2. – Instalação experimental.....	8
2.1. –Torre de Arrefecimento.....	8
2.2. – Aquisição de Dados.....	14
3. – Medição de grandezas e tratamento de dados.....	15
3.1. – Posição do flutuador e válvula do ar.....	15
3.2. – Medição das temperaturas da água.....	16
3.3. – Medição das temperaturas do ar.....	17
3.4. – Caudal de água.....	18
3.5. – Potência da Torre de Arrefecimento.....	19
3.6. – Caudal de Ar.....	19
3.7. – Caudal de evaporação.....	21
4. – Modelo numérico.....	22
4.1. – Análise da torre de arrefecimento em contra corrente.....	22
4.1.1. – Temperatura da água num incremento de volume.....	24
4.1.2. -Entalpia do ar num incremento de volume.....	24
4.1.3. -Entalpia do ar saturado num incremento de volume.....	25
4.1.4. – Determinação do parâmetro característico.....	26
4.1.5. – Previsão das condições de saída da torre.....	50
5. – Conclusão.....	52
6. – Referências Bibliográficas.....	54
7. – Anexos.....	55
Anexo I: Medições obtidas – Temperatura do caudal de água.....	55
Anexo II: Medições obtidas – Temperatura do caudal de ar.....	64
Anexo III: Cálculos – Caudal de ar.....	73
Anexo IV: Cálculos – Pressão da água saturada.....	74
Anexo IV: Cálculos – Entalpia do ar húmido saturado.....	75

Índice de Figuras

Figura 1 - Torre de Arrefecimento com escoamentos em contra corrente	5
Figura 2 - Pressão de vapor saturado em função da temperatura	8
Figura 3 - Torre de Arrefecimento	9
Figura 4 – Enchimento da torre	9
Figura 5 - Bomba circuladora da torre de arrefecimento.....	10
Figura 6 - Rotâmetro	10
Figura 7 – Curva do rotâmetro	11
Figura 8 - Ventilador da Torre de Arrefecimento.....	12
Figura 9 - Localização dos termopares.....	13
Figura 10- Sistema de aquisição de dados.....	14
Figura 11 - Ensaio 1 – Evolução das temperaturas da água durante o ensaio 1	16
Figura 12 - Ensaio 1 – Evolução das temperaturas de bolbo seco e bolbo húmido do ar ao longo do ensaio 1	17
Figura 13 - Transferência de energia num volume diferencial de uma torre de arrefecimento em contra corrente	22
Figura 14 - Entalpia do ar saturado	25
Figura 16 – Dependência do parâmetro β relativamente ao caudal de água para valores particulares do caudal de ar	42
Figura 18 - Dependência do parâmetro β relativamente ao caudal de ar para valores particulares do caudal de água.....	44
Figura 19 -valores de δ para cada um dos ensaios	46
Figura 20 – valores de δ para pontos distintos obtidos experimentalmente.....	47
Figura 21 - Interpolação linear para o calculo do β	48

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores da constante A [$^{\circ}\text{C} - 1$]	7
Tabela 2 - Valores do caudal volúmico máximo de água.....	12
Tabela 3 - Posição do Rotâmetro e Registo de ar.....	15
Tabela 4 - Temperaturas médias da água na Torre de Arrefecimento.....	17
Tabela 5 - Temperaturas médias do ar na Torre de Arrefecimento.....	18
Tabela 6 – Caudal médio de água.....	18
Tabela 7 – Potência média da Torre de Arrefecimento	19
Tabela 8 – Propriedades Psicrométricas médias do ar	20
Tabela 9 - Caudal de ar.....	21
Tabela 10 - Caudal de evaporação.....	21
Tabela 11 - Ensaio 1 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento	26
Tabela 12 - Ensaio 1 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	27
Tabela 13 - Ensaio 2 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	28
Tabela 14 - Ensaio 2 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	28
Tabela 15 - Ensaio 3 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	29
Tabela 16 - Ensaio 3 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	29
Tabela 17 - Ensaio 4 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	30
Tabela 18 - Ensaio 4 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	30
Tabela 19 - Ensaio 5 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	31
Tabela 20 - Ensaio 5 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	32
Tabela 21 - Ensaio 6 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	32
Tabela 22 – Ensaio 6 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	33

Tabela 23 - Ensaio 7 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	34
Tabela 24 - Ensaio 7 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	34
Tabela 25 - Ensaio 8 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	35
Tabela 26 - Ensaio 8 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	35
Tabela 27 - Ensaio 9 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos	36
Tabela 28 - Ensaio 9 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	37
Tabela 29 - Ensaio 10 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento	37
Tabela 30 - Ensaio 10 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	38
Tabela 31 - Ensaio 11 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento	39
Tabela 32 - Ensaio 11 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	39
Tabela 33 - Ensaio 12 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento	40
Tabela 34 - Ensaio 12 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica.....	40
Tabela 35 - Parâmetro característico da torre de arrefecimento	41
Tabela 36 - Caudal médio de ar.....	42
Tabela 37 - Parâmetro β para caudais de água e ar particulares	43
Tabela 38 - Parâmetro Característico das condições intermédias com o caudal de água igual	46
Tabela 39 - Parâmetro Característico para um caudal de água diferente do caudal de água medido.....	49
Tabela 40 - Previsão das condições de saída da torre de arrefecimento.....	50
Tabela 41 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento.....	51

Tabela 42 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica	51
Tabela 43 - Ensaio 1 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	55
Tabela 44 - Ensaio 2 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	55
Tabela 45 - Ensaio 3 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	56
Tabela 46 - Ensaio 4 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	57
Tabela 47 - Ensaio 5 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	58
Tabela 48 - Ensaio 6 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	58
Tabela 49 - Ensaio 7 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	59
Tabela 50 - Ensaio 8 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	60
Tabela 51 - Ensaio 9 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	61
Tabela 52 - Ensaio 10 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	61
Tabela 53 -Ensaio 11 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	62
Tabela 54 - Ensaio 12 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água	63
Tabela 55 - Ensaio 1 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	64
Tabela 56 - Ensaio 2 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	64
Tabela 57 - Ensaio 3 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	65
Tabela 58 - Ensaio 4 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	66
Tabela 59 - Ensaio 5 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	67
Tabela 60 - Ensaio 6 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	68
Tabela 61 - Ensaio 7 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	68
Tabela 62 - Ensaio 8 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	69
Tabela 63 - Ensaio 9 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	70
Tabela 64 - Ensaio 10 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	71
Tabela 65 - Ensaio 11 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	71
Tabela 66 - Ensaio 12 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar	72
Tabela 67 - Pressão água Saturada	74
Tabela 68 - Entalpia do ar húmido saturado	75

Nomenclatura

cp_l	Calor específico da água a Pressão Constante	$J/kg\ ^\circ C$
\dot{m}_l	Caudal mássico de água	kg/s
\dot{m}_g	Caudal mássico de ar	kg/s
\dot{m}_{ev}	Caudal mássico de vapor de água	kg/s
$\dot{V}_{l,100\%}$	Caudal volúmico máximo de água	l/min
w_g	Conteúdo de humidade do ar húmido	$g/kg_{a.s}$
dT_l	Diferença de temperatura da água	$^\circ C$
dh_g	Diferença entálpica da água	kJ/kg
h_g	Entalpia do ar	J/kg
h_g	Entalpia do ar saturado	kJ/kg
h_v	Entalpia específica do vapor de água	kJ/kg
ρ_l	Massa específica da água	kg/m^3
$\frac{h_c * A}{cp_u}$	Parâmetro característico da torre de arrefecimento	$kW/(kJ/kg)$
α_l	Percentagem do caudal máximo de água	$\%$
f	Posição do Rotâmetro	cm
\dot{Q}_{Torre}	Potência da Torre de Arrefecimento	W
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
P_{vg}	Pressão de vapor de água	Pa
P_{vs}	Pressão de vapor saturado	Pa

T_l	Temperatura da água	°C
T'_g	Temperatura de bolbo húmido do ar	°C
T_g	Temperatura de bolbo seco do ar	°C
t	Tempo	s
Secção	s_n	

Introdução

As torres de arrefecimento são usadas para arrefecer um escoamento de água em sistemas de ar condicionado, sistemas de refrigeração, centrais termoelétricas e também em muitas indústrias. O arrefecimento é conseguido através da evaporação da parte da água quando em contacto com um escoamento de ar. A circulação do escoamento do ar nas torres de arrefecimento pode ser natural ou forçada por ação de ventiladores. A configuração dos escoamentos dos dois fluidos envolvidos no processo pode ser de fluxos em contra-corrente ou de fluxos cruzados.

A temperatura de bolbo húmido do ar é um parâmetro fundamental na análise dos fenómenos de transferência de calor e massa que ocorrem numa torre porque o seu valor na entrada da torre dita o valor mínimo teórico que a temperatura da água pode alcançar.

No caso das instalações de refrigeração e de ar condicionado as torres de arrefecimento são utilizadas para arrefecer um escoamento de água, por sua vez é utilizado para arrefecer um ou mais condensadores das máquinas frigoríficas, na maior parte dos casos de compressão mecânica. A maior parte dos sistemas de climatização com máquinas frigoríficas não têm torres de arrefecimento, sendo o calor rejeitado pelo condensador de tais máquinas diretamente para a atmosfera. Todavia quando a temperatura do ar exterior é elevada a eficiência energética das máquinas frigoríficas com condensador arrefecido o ar é reduzido, obrigando a que o sistema tenha consumos de energia elevados e em situações mais extremas o sistema poderá até não funcionar em virtude das pressões alcançadas no interior da máquina.

Em climas quentes e não muito húmidos o recurso a uma torre de arrefecimento garante a funcionalidade do sistema, o que é uma grande vantagem relativamente aos sistemas mais usuais e mais simples. Para além dos ventiladores, no caso das torres com circulação de ar forçada, é necessário também uma bomba para garantir a circulação de água entre a torre propriamente dita e o permutador de calor a arrefecer. Tanto os ventiladores como as bombas são equipamentos com consumo de energia nas desprezável. O ruído gerado por estes equipamentos deverá ter-se em conta na escolha da sua localização.

O presente estudo tem como objetivo estudar a transferência de calor e massa entre um caudal de água e um caudal de ar que circulam em contra corrente.

A torre de arrefecimento utilizada nos ensaios funciona de modo a que o caudal de ar, insuflado por um ventilador, entre na parte inferior da torre enquanto que o caudal de água é bombeado para a parte superior da torre. Ambos os escoamentos escoam verticalmente, mas em sentidos opostos, caracterizando a torre de arrefecimento com fluxos em contra corrente.

O ar foi induzido para o interior da torre de arrefecimento através de um ventilador já integrado na bancada de ensaio.

A água introduzida pela parte superior da torre foi previamente aquecida num condensador, simulando assim o funcionamento de uma instalação recorrente no mercado.

Neste estudo é apresentado a construção de um modelo numérico de simulação dos fenómenos de transferência de calor e massa, que traduz a evolução das temperaturas de ambos os escoamentos (ar e água) ao longo da torre.

1. – Caracterização de uma torre de arrefecimento

Neste capítulo descrevem-se os fenómenos teóricos da transferência de calor e massa de uma torre de arrefecimento.

1.1. – Transferência de calor e massa

A torre de arrefecimento tem como função arrefecer um escoamento de água, que por ela circula, rejeitando esse calor para a atmosfera por meio de um escoamento de ar.

A torre de arrefecimento em estudo, figura é caracterizada pela configuração dos escoamentos em contra corrente.

O escoamento de água quente entra pela parte superior da torre onde é depois pulverizada por aspersores, garantindo assim uma boa distribuição do escoamento por toda a torre. A água arrefecida é posteriormente armazenada num depósito sendo novamente bombeada para a parte superior da torre.

Por sua vez o escoamento de ar é insuflado pela parte inferior da torre por ação de um ventilador acoplado ao banco de ensaios.

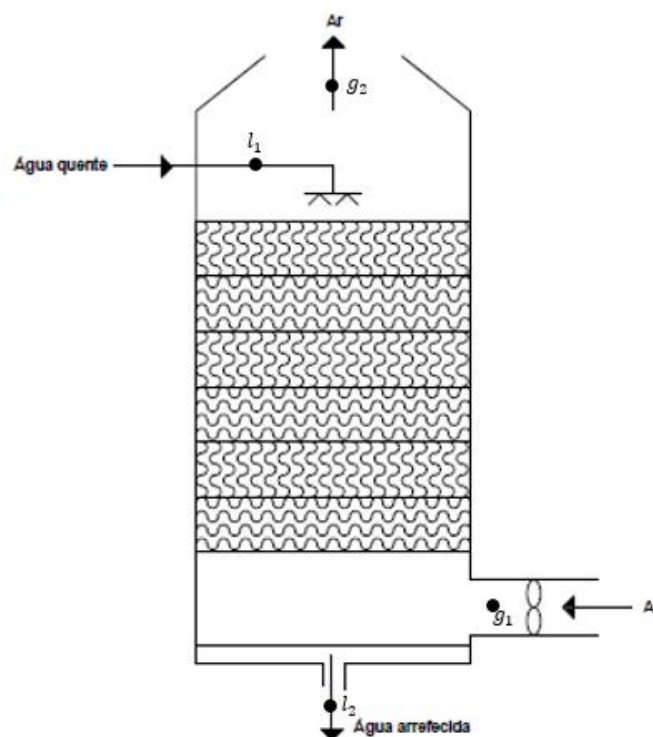


Figura 1 - Torre de Arrefecimento com escoamentos em contra corrente

O arrefecimento sofrido pelo escoamento de água quente deve-se ao facto de haver transferência de calor sensível e latente com o escoamento de ar não saturado. A troca de calor sensível ocorre quando a temperatura do ar é inferior à temperatura da água introduzida na torre, no entanto o arrefecimento ocorre substancialmente pela troca de calor latente associada à evaporação da água para o escoamento de ar.

De forma a se obter as equações para o cálculo do caudal de evaporação, caudal de água e potência da torre de arrefecimento, estabeleceu-se balanços mássicos e energéticos em torno da torre de arrefecimento, figura (1).

Analisando o comportamento do escoamento de ar e levando em conta o princípio da conservação de massa obteve-se a seguinte equação,

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{g_1} = \dot{m}_{g_2} \quad (1)$$

Ou seja, o caudal de ar mantém-se constante ao longo da torre de arrefecimento.

Analisando agora o comportamento do escoamento de água e considerando também o caudal de evaporação, obteve-se a seguinte equação,

$$\dot{m}_{l_1} + \dot{m}_{l_3} + \dot{m}_{v_1} = \dot{m}_{v_2} + \dot{m}_{l_2} \quad (2)$$

A potência da torre de arrefecimento pode ser calculada através da variação entálpica sofrida pelo escoamento de ar,

$$\dot{Q}_{Torre} = \dot{m}_g * (h_{g_2} - h_{g_1}) \quad (3)$$

A potência da torre de arrefecimento pode também ser enunciada através do arrefecimento sofrido pelo escoamento de água,

$$\dot{Q}_{Torre} = \dot{m}_l * c_{p_l} * (T_{l_1} - T_{l_2}) \quad (4)$$

Como é garantida a reposição da água no sistema, a fração que evapora e que deve ser novamente repostada no interior da torre pode ser calculada através da variação do conteúdo de humidade sofrido pelo escoamento de ar.

$$\dot{m}_{ev} = \dot{m}_g * (w_{g2} - w_{g1}) \quad (5)$$

Uma vez que se pretende trabalhar com a torre em regime permanente, a potência calorífica libertada pelo escoamento de água é igual à potência calorífica ganha pelo escoamento de ar, assim sendo conhecendo a potência da torre e reformulando a equação 3, o caudal de ar pode ser calculado através da seguinte equação,

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{Q}_{Torre}}{(h_{g2} - h_{g1})} \quad (6)$$

A entalpia do ar húmido, h_g , depende do conteúdo de humidade do ar, w_g , e da temperatura de bolbo seco do escoamento de ar, obtendo-se através da seguinte equação,

$$h_g = 1000 * T_g + w_g * (2501 * 10^3 + 1805 * T_g) \quad (7)$$

O conteúdo de humidade do ar húmido relaciona-se com a pressão de vapor de água, P_{vg} e a pressão atmosférica, P_{atm} , do seguinte modo,

$$w_g = 0,62198 * \frac{P_{vg}}{P_{atm} - P_{vg}} \quad (8)$$

Para o cálculo da pressão de vapor de água utilizou-se a expressão empírica dos psicrómetros, expressa da seguinte forma,

$$P_{vg} = P_{vs}(T'_g) - P_{atm} * A * (T_g - T'_g) \quad (9)$$

Em que a constante de A depende do tipo de proteção utilizadas no termómetro de bolbo húmido e da própria temperatura medida por ele. Os valores desta constante são apresentados na tabela 1,

Tabela 1 - Valores da constante A [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Termómetro	Protegido	Não protegido
$T'_g < 0^{\circ}\text{C}$	$7,20 * 10^{-4}$	$5,94 * 10^{-4}$
$T'_g \geq 0^{\circ}\text{C}$	$7,99 * 10^{-4}$	$6,66 * 10^{-4}$

No gráfico seguinte, figura 2, apresenta-se a evolução da pressão de vapor saturado em função da temperatura.

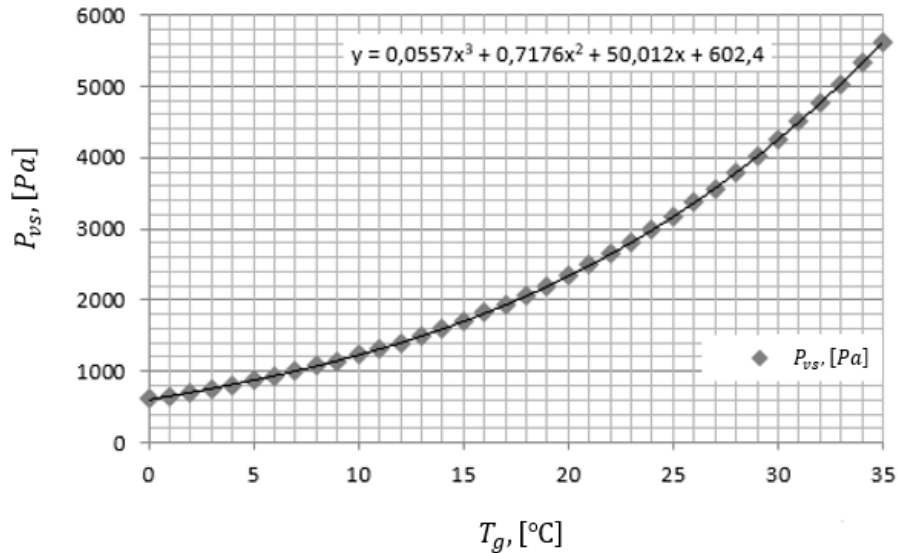


Figura 2 - Pressão de vapor saturado em função da temperatura

Através da linha de tendência traçada no gráfico obteve-se a seguinte correlação para o cálculo da pressão de vapor saturado,

$$P_{vs}(T_g) = 0,0557 * T_g^3 + 0,7176 * T_g^2 + 50,012 * T_g + 602,4 \quad (10)$$

2. – Instalação experimental

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios na torre de arrefecimento.

2.1. –Torre de Arrefecimento

A torre de arrefecimento, figura (3), encontra-se instalada no laboratório de Engenharia Mecânica do I.S.E. Este modelo de torre foi adquirido à empresa *TecQuipment* e é destinada para fins académicos.



Figura 3 - Torre de Arrefecimento

A transferência de calor entre o escoamento de água e o escoamento de ar nesta torre é feita através de um enchimento disposto alternadamente ao longo da mesma, fazendo um total de seis camadas, como pode ser observado na figura 4.

Este enchimento torna mais eficiente o processo de arrefecimento do escoamento de água devido ao aumento da área de transferência entre os dois escoamentos.



Figura 4 – Enchimento da torre

A água inserida na torre é previamente aquecida num condensador, sendo depois bombeada até à parte superior da torre onde é pulverizada sobre as superfícies dos miolos,

acumulando-se num depósito existente por baixo da torre, circulando novamente pelo condensador e sendo depois bombeada novamente para a torre.

Para que a água faça o percurso do condensador para a torre de arrefecimento e da torre de arrefecimento para o condensador foi necessário utilizar duas bombas. Uma bomba incorporada no conjunto da torre de arrefecimento, figura 5.



Figura 5 - Bomba circuladora da torre de arrefecimento

O rotâmetro, figura 6, instalado à saída da bomba permitiu controlar que se controlasse e medisse o escoamento de água quente a circular na torre de arrefecimento.



Figura 6 - Rotâmetro

As leituras foram feitas de acordo com a escala marcada no rotâmetro, em centímetros. A posição do mesmo foi ajustado de acordo com o caudal pretendido para a realização do ensaio.

Para o calculo do caudal de água a circular na torre utilizou-se a seguinte equação,

$$\dot{V}_l = \alpha_l * \dot{V}_{l,Max} \quad (11)$$

Em que o $\dot{V}_{l,Max}$ é o valor do caudal volúmico máximo de água e que depende da temperatura da água como se pode consultar na tabela 2. O parâmetro α_l é um caudal adimensional cuja dependência relativa à posição do flutuador, f , esta representada na figura 7.

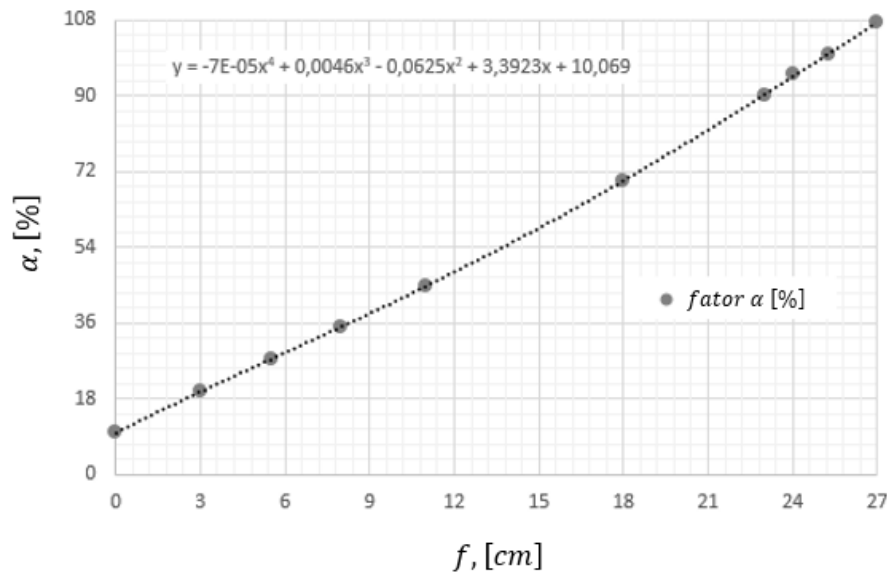


Figura 7 – Curva do rotâmetro

A seguinte correlação traduz a representação gráfica do caudal de água adimensional em função da posição do flutuador,

$$\alpha_l = -7 * 10^{-5} * f^4 + 0,0046 * f^3 - 0,0625 * f^2 + 3,392 * f + 10,069 \quad (12)$$

Tal como foi referido anteriormente, o valor de $\dot{V}_{l,Max}$ depende da temperatura do escoamento de água, tabela 2.

Tabela 2 - Valores do caudal volúmico máximo de água

T_l [°C]	$\dot{V}_{l,Max}$ [l/min]
20	20
60	20,2

Uma vez conhecida a temperatura do escoamento de água à entrada da torre e recorrendo a uma interpolação linear de valores, determinou-se o caudal volúmico máximo através da seguinte equação,

$$\dot{V}_{l,Max} = \frac{(20,2 - 20) * (T_{A1} - 20)}{60 - 20} + 20 \quad (13)$$

Assim sendo o caudal de água pode ser calculado pela seguinte expressão,

$$\dot{m}_l = \frac{\dot{V}_l * \rho_l}{1000 * 60} \quad (14)$$

O escoamento de ar foi insuflado para o interior da torre através de um ventilador, figura 8, integrado no banco de ensaio. A conduta que o segue dispõe de uma válvula que permitiu uma regulação, apesar de grosseira, da quantidade de ar a ser insuflada para o interior da torre.



Figura 8 - Ventilador da Torre de Arrefecimento

Para a medição das temperaturas dos caudais de ar e água foram instalados termopares ao longo da torre de arrefecimento. As localizações dos mesmos estão representadas na figura 9,

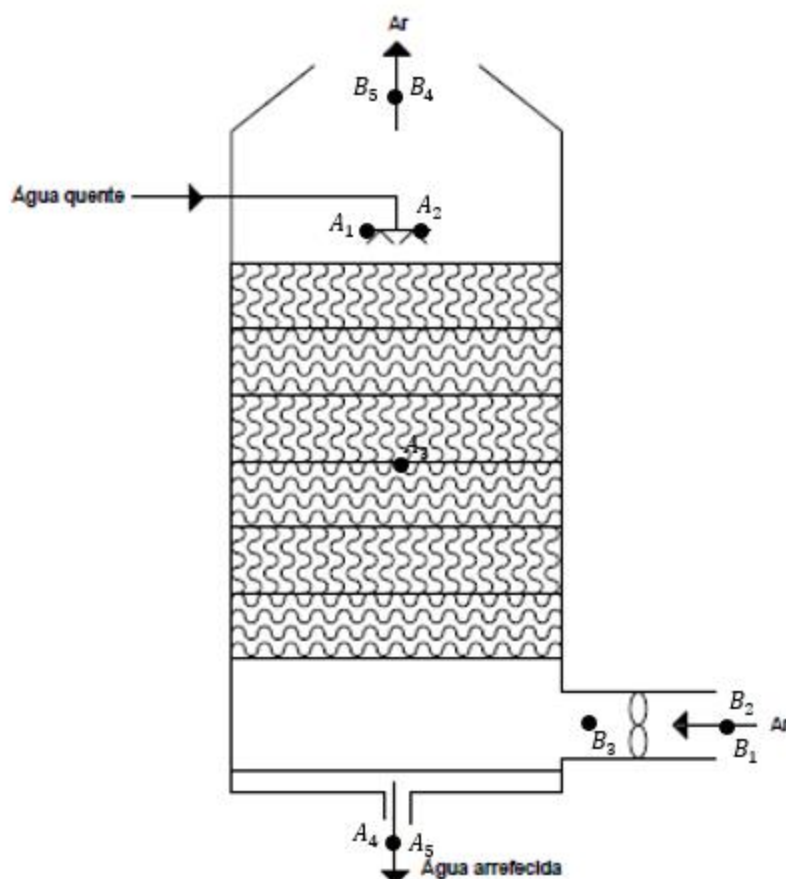


Figura 9 - Localização dos termopares

Os termopares com designação A_1 a A_5 representados na figura efetuaram as leituras das temperaturas do escoamento de água,

- Termopar A_1, A_2 – Temperatura da água à entrada da torre de arrefecimento
- Termopar A_3 – Temperatura da água a passar miolo a meio da torre
- Termopar A_5, A_4 – Temperatura da água à saída da torre de arrefecimento.

De modo a que os termopares medissem apenas a temperatura do caudal de água, estes foram colocados dentro de pequenos copos. Os copos tinham um volume reduzido para permitir uma renovação mais rápida do escoamento da água dentro do copo.

Na entrada e saída da água da torre foram colocados dois termopares no mesmo copo de forma a garantir uma maior precisão na medição das temperaturas.

Os termopares com a designação de B_1 a B_5 representados na figura efetuaram as leituras das temperaturas do escoamento de ar,

- Termopar B_1 – Temperatura de bolbo seco do ar à entrada da torre de arrefecimento
- Termopar B_2 – Temperatura de bolbo húmido do ar à entrada da torre de arrefecimento
- Termopar B_3 – Temperatura de bolbo seco do ar após atravessar o ventilador
- Termopar B_4 – temperatura de bolbo seco do ar à saída da torre de arrefecimento
- Termopar B_5 – temperatura de bolbo húmido do ar à saída da torre de arrefecimento

No decorrer dos ensaios teve-se de garantir que os termopares responsáveis pela medição das temperaturas de bolbo húmido do ar mantinham as suas extremidades humedecidas.

2.2.– Aquisição de Dados

Para recolher e armazenar os valores lidos pelos termopares utilizou-se um sistema de aquisição de dados, da marca *Delta T*.

A caixa de aquisição de dados *DL2 e Data Logger*, figura 10 é composta por um painel de terminais, onde são conectados os termopares, uma ficha RS232 que permite conectar a caixa a um computador e uma placa de circuito responsável pela recolha e armazenamento da informação captada pelos termopares.

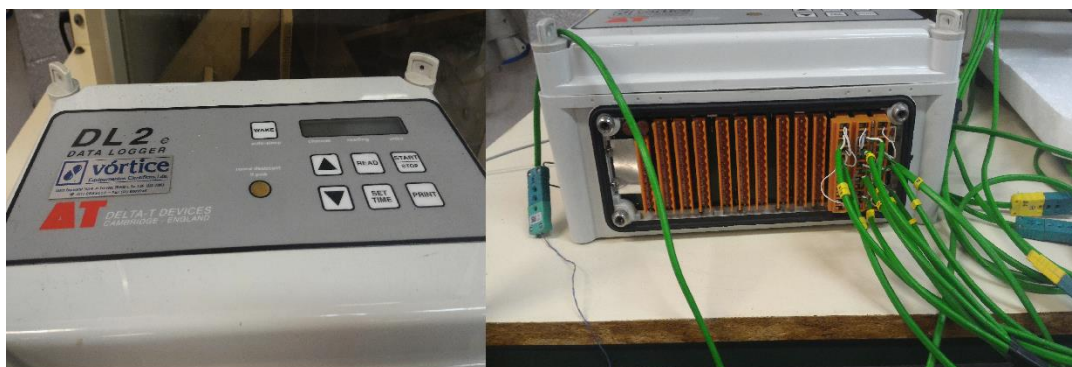


Figura 10- Sistema de aquisição de dados

Cada termopar ocupa um canal na caixa de aquisição, a caixa tem disponível um total de 64 canais, no entanto para os ensaios apenas foram ocupados 10 canais.

3. – Medição de grandezas e tratamento de dados

Tal como já foi referido anteriormente, para medir as temperaturas dos escoamentos de a e água foram posicionados termopares ao longo da torre, a localização dos mesmo pode ser observada na figura 9. Os termopares responsáveis pela medição da temperatura do escoamento de água foram colocados dentro de pequenos recipientes, a fim de medirem apenas a temperatura da água e não da mistura ar/água. Para os termopares responsáveis pela aquisição das temperaturas de bolbo húmido do ar, colocados antes do ventilador e à saída da torre, foi necessário garantir que as extremidades em contacto com o escoamento de ar encontravam-se humedecidas.

Cada ensaio teve uma duração de 10 minutos de forma a garantir que torre atingisse o regime permanente enquanto a recolha e o armazenamento dos valores das temperaturas, medidos pelos termopares, foram feitos em intervalos de 10 segundos.

Os dados armazenados na caixa de aquisição foram posteriormente transferidos para um computador para que procedesse ao tratamento da informação recolhida.

3.1.– Posição do flutuador e válvula do ar

Os caudais de água e de ar mantiveram-se constantes ao longo dos ensaios. Antes de iniciar cada ensaio ajustou-se o rotâmetro e a válvula de ar para as posições pretendidas.

A válvula de ar foi regulada para três posições diferentes, na posição designada por “a” o registo encontra-se completamente aberto, na posição designada por “b” o registo encontra-se quase fechado e finalmente na posição designada por “c” corresponde a uma posição intermédia do registo.

Na tabela 3 apresenta as posições do registo de ar e as posições do rotâmetro adquiridas em cada ensaio.

Tabela 3 - Posição do Rotâmetro e Registo de ar

	f [cm]	Posição do registo de ar
Ensaio 1	12	a
Ensaio 2	10	a
Ensaio 3	9	a
Ensaio 4	8	a
Ensaio 5	12	b
Ensaio 6	10	b

	f [cm]	Posição do registo de ar
Ensaio 7	9	b
Ensaio 8	8	b
Ensaio 9	12	c
Ensaio 10	10	c
Ensaio 11	9	c
Ensaio 12	8	c

3.2.– Medição das temperaturas da água

Como já foi referido anteriormente, os ensaios tiveram uma duração de 10 minutos de forma a garantir que as condições da torre atingissem o regime permanente. No entanto, para os cálculos foram apenas consideradas as ultimas 20 leituras.

A figura 11 apresenta a evolução da temperatura da água, medido pelo respetivo termopar, ao longo do ensaio 1. Como pode ser observado a evolução das temperaturas é praticamente linear indicando que a torre se encontra em condições de regime permanente.

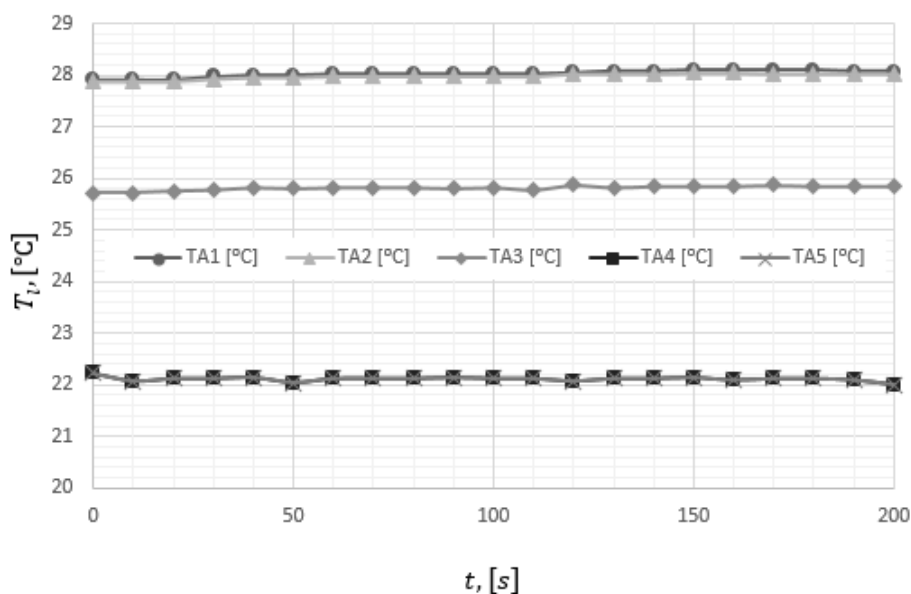


Figura 11 - Ensaio 1 – Evolução das temperaturas da água durante o ensaio 1

A tabela 4 apresenta os valores das temperaturas médias do escoamento de água, medidos pelos termopares, de cada ensaio realizado.

Os valores da temperatura do caudal de água medido pelos termopares, bem como o desvio padrão de cada ensaio, podem ser consultados no Anexo I.

Tabela 4 - Temperaturas médias da água na Torre de Arrefecimento

	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
Ensaio 1	28,0	28,0	25,8	22,1	22,1
Ensaio 2	28,5	28,5	25,7	21,6	21,5
Ensaio 3	29,1	29,1	25,9	21,5	21,5
Ensaio 4	29,3	29,3	25,8	21,3	21,3
Ensaio 5	33,8	33,8	32,9	27,9	27,9
Ensaio 6	34,1	34,0	32,8	27,3	27,3
Ensaio 7	34,4	34,4	32,9	27,0	27,0
Ensaio 8	34,1	34,1	32,2	26,1	26,3
Ensaio 9	31,0	31,0	29,6	25,1	25,1
Ensaio 10	30,5	30,5	28,7	24,2	24,2
Ensaio 11	31,2	31,2	29,0	24,1	24,2
Ensaio 12	31,6	31,6	29,0	23,9	23,7

3.3.– Medição das temperaturas do ar

Para o tratamento dos dados da temperatura do ar procedeu-se de igual forma, foram apenas considerados as ultimas 20 leituras de cada ensaio.

O figura 4 apresenta a evolução das temperaturas de bolbo seco e bolbo húmido do ar, lido pelo respetivo termopar, ao longo do ensaio.

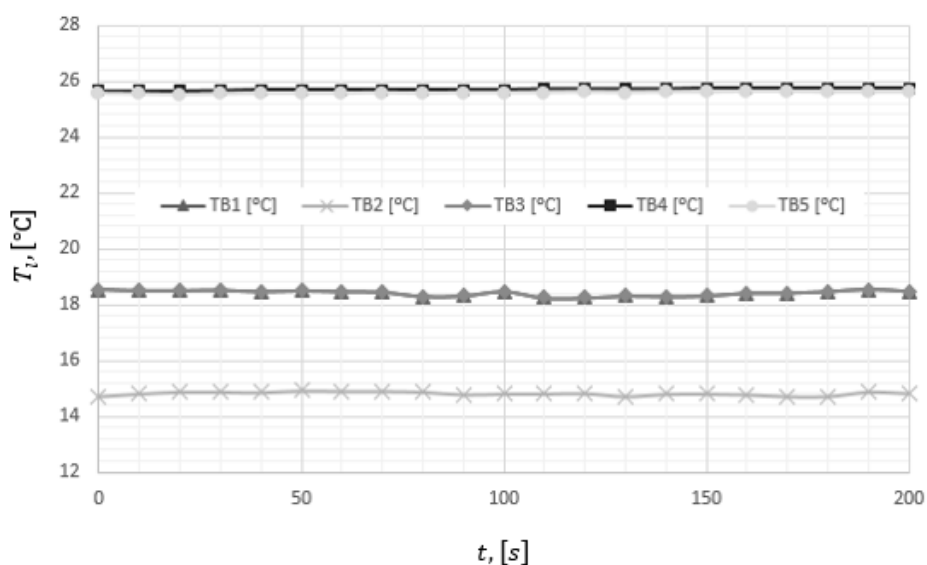


Figura 12 - Ensaio 1 – Evolução das temperaturas de bolbo seco e bolbo húmido do ar ao longo do ensaio 1

A tabela abaixo apresenta os valores das temperaturas médias de bolbo seco e bolbo húmido do ar, medidos pelos respectivos termopares, de cada ensaio realizado.

Os valores da temperatura do caudal de água medido pelos termopares bem como o desvio padrão, de cada ensaio, podem ser consultados no Anexo II.

Tabela 5 - Temperaturas médias do ar na Torre de Arrefecimento

	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
Ensaio 1	18,4	14,8	18,4	25,7	25,6
Ensaio 2	18,9	14,9	18,9	25,8	25,6
Ensaio 3	19,0	15,0	19,0	26,2	26,0
Ensaio 4	19,3	15,4	19,3	26,0	25,9
Ensaio 5	19,2	15,3	19,2	32,0	31,9
Ensaio 6	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
Ensaio 7	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
Ensaio 8	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
Ensaio 9	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
Ensaio 10	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
Ensaio 11	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
Ensaio 12	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0

Para que os ensaios fossem considerados válidos a evolução das temperaturas dos escoamentos de ar e água deveriam apresentar uma evolução pratica linear.

3.4.– Caudal de água

Na tabela 6 apresentam-se os valores médios do parâmetro α_l calculado pela equação 9, os valores médios do caudal volúmico máximo de água, $\dot{V}_{l,100\%}$ calculado através da equação 10 e o valor médio do caudal de água de cada ensaio calculado através da equação 11.

Tabela 6 – Caudal médio de água

Ensaio	α_l [%]	$Med(T_{A1}, T_{A2})$ [°C]	$\dot{V}_{l,100\%}$ [l/mint]	\dot{m}_l [kg/s]
Ensaio 1	48,3	28,0	20,0	0,161
Ensaio 2	41,6	28,5	20,0	0,139
Ensaio 3	38,4	29,1	20,0	0,128
Ensaio 4	35,3	29,3	20,0	0,118
Ensaio 5	48,3	33,8	20,0	0,161
Ensaio 6	41,6	34,1	20,0	0,139
Ensaio 7	38,4	34,4	20,0	0,128
Ensaio 8	35,3	34,1	20,0	0,118
Ensaio 9	48,3	31,0	20,0	0,161

Ensaio	α_l [%]	$Med(T_{A1}, T_{A2})$ [°C]	$\dot{V}_{l,100\%}$ [l/mint]	\dot{m}_l [kg/s]
Ensaio 10	41,6	30,5	20,0	0,139
Ensaio 11	38,4	31,2	20,0	0,128
Ensaio 12	35,3	31,6	20,0	0,118

3.5.– Potência da Torre de Arrefecimento

Visto que foram colocados dois termopares para a leitura das condições de entrada e de saída da torre e uma vez que as medidas lidas pelos termopares foram semelhantes para o cálculo da potência da torre foram utilizados os valores da média aritmética das temperaturas.

A tabela 7 apresentam-se os valores do caudal médio de água, calculado anteriormente, os valores da média aritmética das temperaturas da água à entrada e à saída da torre e a potência da torre de arrefecimento calculada através da equação 2.

Tabela 7 – Potência média da Torre de Arrefecimento

Ensaio	\dot{m}_l [kg/s]	$Med(T_{A1}, T_{A2})$ [°C]	$Med(T_{A4}, T_{A5})$ [°C]	\dot{Q}_{Torre} [kW]
Ensaio 1	0,161	28,0	22,1	3955,3
Ensaio 2	0,139	28,5	21,6	4044,5
Ensaio 3	0,128	29,1	21,5	4105,2
Ensaio 4	0,118	29,3	21,3	3953,9
Ensaio 5	0,161	33,8	27,9	3960,6
Ensaio 6	0,139	34,1	27,3	3918,4
Ensaio 7	0,128	34,4	27,0	3970,2
Ensaio 8	0,118	34,1	26,2	3870,6
Ensaio 9	0,161	31,0	25,1	3988,5
Ensaio 10	0,139	30,5	24,2	3688,2
Ensaio 11	0,128	31,2	24,1	3798,7
Ensaio 12	0,118	31,6	23,8	3861,6

3.6.– Caudal de Ar

Tal como já foi referido anteriormente trabalhou-se com a torre de arrefecimento em regime permanente, sendo assim, a potência calorífica libertada pelo escoamento de água, calculada anteriormente, é igual à potência calorífica ganha pelo escoamento de ar.

As equações anteriormente enunciadas, para o cálculo do caudal de ar, levaram em conta um balanço energético entre as condições de entrada e de saída de um escoamento de ar.

Na torre de arrefecimento o foram colocados termopares antes e depois do ventilador, figura 9, para que fosse medido o aquecimento sensível sofrido pelo escoamento de ar ao transpor o ventilador.

Na tabela 8, constam os valores das propriedades psicrométricas médias do escoamento de ar de cada ensaio.

Obteve-se a pressão de vapor saturado referente aos termopares B_2 e B_5 através da equação 7, a pressão de vapor relativa aos termopares B_3 e B_4 calculou-se através da equação 6, os conteúdos de humidade e entalpias respetivos aos termopares B_3 e B_4 determinaram-se com base nas equações 5 e 8, respetivamente.

Tabela 8 – Propriedades Psicrométricas médias do ar

Ensaio	$P_{vs}(T'_{B2})$ [Pa]	$P_{vs}(T'_{B5})$ [Pa]	P_{vB3} [Pa]	P_{vB4} [Pa]	w_{B3} [g/kg _{a,s}]	w_{B4} [g/kg _{a,s}]	h_{B3} [kJ/kg]	h_{B4} [kJ/kg]
Ensaio 1	1682,6	3282,4	1439,6	3291,5	8,96	20,9	41,1	78,9
Ensaio 2	1689,2	3292,4	1416,6	3303,0	8,82	21,0	41,2	79,2
Ensaio 3	1697,4	3357,8	1423,3	3372,8	8,86	21,4	41,5	80,8
Ensaio 4	1742,8	3345,9	1475,8	3355,2	9,19	21,3	42,6	80,3
Ensaio 5	1735,1	4750,2	1475,3	4748,6	9,19	30,6	42,5	110,2
Ensaio 6	1735,1	4784,2	1465,9	4775,8	9,13	30,8	42,4	110,8
Ensaio 7	1735,1	4816,6	1452,8	4810,2	9,05	31,0	42,4	111,5
Ensaio 8	1616,6	4707,6	1304,8	4691,8	8,11	30,2	39,3	109,1
Ensaio 9	1746,2	4053,2	1472,5	4049,6	9,17	25,9	42,7	95,3
Ensaio 10	1757,4	3897,7	1477,7	3894,0	9,21	24,9	42,9	91,9
Ensaio 11	1757,4	3987,6	1489,0	3984,2	9,28	25,5	43,0	93,88
Ensaio 12	1746,2	4026,9	1461,3	4021,8	9,10	25,7	42,7	94,70

Conhecida potência da torre e as entalpias do caudal de ar á entrada e saída da torre de arrefecimento, calculou-se o caudal de ar através da equação 4, enunciada anteriormente.

A tabela 9 apresenta os valores do caudal de ar, de cada ensaio, em função da posição do registo . No entanto, apesar de o registo se encontrar na mesma posição nos respetivos ensaios, os valores do caudal de ar não se apresentam iguais em alguns ensaios.

Tabela 9 - Caudal de ar

Ensaio	γ	\dot{m}_g [kg/s]
Ensaio 1	a	0,105
Ensaio 2	a	0,107
Ensaio 3	a	0,105
Ensaio 4	a	0,105
Ensaio 5	b	0,058
Ensaio 6	b	0,057
Ensaio 7	b	0,057
Ensaio 8	b	0,056
Ensaio 9	c	0,076
Ensaio 10	c	0,075
Ensaio 11	c	0,075
Ensaio 12	c	0,074

Os valores do caudal de ar referentes a cada ensaio podem ser consultados no Anexo IV.

3.7.– Caudal de evaporação

Conhecida a potência da torre e o caudal de ar e os conteúdos de humidade do escoamento de ar à entrada e à saída da torre, calculou-se o caudal de evaporação através da equação 5.

Na tabela 10 apresentam-se os valores do caudal de ar, dos conteúdos de humidade à entrada e à saída da torre e o caudal de evaporação.

Tabela 10 - Caudal de evaporação

Ensaio	\dot{m}_g [kg/s]	w_{B3} [g/kg _{a.s.}]	w_{B4} [g/kg _{a.s.}]	\dot{m}_{ev} [kg/s]
Ensaio 1	0,105	8,96	20,9	1,25E-03
Ensaio 2	0,107	8,82	21,0	1,30E-03
Ensaio 3	0,105	8,86	21,4	1,31E-03
Ensaio 4	0,105	9,19	21,3	1,27E-03
Ensaio 5	0,058	9,19	30,6	1,25E-03
Ensaio 6	0,057	9,13	30,8	1,24E-03
Ensaio 7	0,057	9,05	31,0	1,26E-03
Ensaio 8	0,056	8,11	30,2	1,23E-03
Ensaio 9	0,076	9,17	25,9	1,27E-03
Ensaio 10	0,075	9,21	24,9	1,18E-03
Ensaio 11	0,075	9,28	25,5	1,21E-03

Ensaio	\dot{m}_g [kg/s]	w_{B3} [g/kg _{a.s}]	w_{B4} [g/kg _{a.s}]	\dot{m}_{ev} [kg/s]
Ensaio 12	0,074	9,10	25,7	1,23E-03

4. – Modelo numérico

4.1.– Análise da torre de arrefecimento em contra corrente

A figura 13 ilustra um volume diferencial da torre de arrefecimento com os escoamentos em contra corrente onde o escoamento de ar \dot{m}_g entra pela parte inferior do volume diferencial com uma entálpia de h_g e sai pela parte superior do mesmo com uma entálpia de $dh_g + h_g$. O escoamento de água entra pela parte superior do volume diferencial com uma temperatura T_l e deixa-o com uma temperatura $T_l - dT_l$.

A fim de simplificar os cálculos do parâmetro característico a quantidade de água evaporada é desprezada.

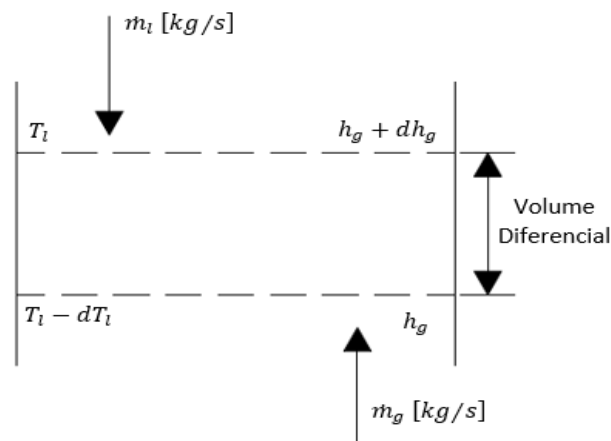


Figura 13 - Transferência de energia num volume diferencial de uma torre de arrefecimento em contra corrente, Stoecker (1985)

Estabeleceu-se um balanço energético em torno do volume diferencial de forma a obter as equações de balanço.

A taxa de energia pode ser determinada através da variação entálpica sofrida pelo escoamento de ar,

$$d\dot{q} = \dot{m}_g * dh_g \quad (15)$$

A taxa de energia pode ainda ser determinada através do arrefecimento sofrido pelo escoamento de água,

$$d\dot{q} = \dot{m}_l * cp_l * dT_l \quad (16)$$

Uma vez que a energia removida da água é igual à energia adquirida pelo ar, pode-se reescrever as duas equações da seguinte forma,

$$d\dot{q} = \dot{m}_g * dh_g = \dot{m}_l * cp_l * dT_l \quad (17)$$

No entanto, a condensação de água existente no escoamento do volume diferencial, é representado pela seguinte equação,

$$d\dot{q} = \frac{h_c dA}{cp_u} * (h_i - h_g) \quad (18)$$

Combinando as equações 17 e 18, de forma a obter o calor transferido no volume diferencial,

$$\frac{h_c dA}{cp_u} * (h_i - h_g) = \dot{m}_g * dh_g = \dot{m}_l * cp_l * dT_l \quad (19)$$

Reescrevendo a equação e substituindo $\dot{m}_g * dh_g = d\dot{q}$,

$$\frac{h_c dA}{cp_u} = \frac{d\dot{q}}{(h_i - h_g)} = \frac{\dot{m}_l * cp_l * dT_l}{(h_i - h_g)} \quad (20)$$

Integrando a equação 20 de forma a obter o calor transferido em toda a torre de arrefecimento,

$$\int_0^A \frac{h_c dA}{cp_u} = \dot{m}_l * cp_l = \int_{T_{l,s}}^{T_{l,e}} \frac{dT_l}{(h_i - h_g)} \quad (21)$$

Sendo o escoamento de água constante ao longo do ensaio,

$$\delta = \frac{h_c dA}{cp_u} = \dot{m}_l * cp_l * dT_l * \sum \frac{1}{(h_i - h_g)_m} \quad (22)$$

O coeficiente $\frac{h_c dA}{cp_u}$ que caracteriza o funcionamento de uma torre de arrefecimento, *Stoecker (1985)* relaciona-se com o caudal de água, com a diferença de temperatura e por a diferença de entalpias média, para um incremento de volume.

4.1.1. – Temperatura da água num incremento de volume

A variação da temperatura da água, dT_l , é igual em todos os incrementos de volume uma vez que a torre de arrefecimento é dividida em secções idênticas. Esta depende da temperatura da água à entrada e à saída da torre e do número de secções em que a torre foi dividida.

$$dT_l = \frac{T_{l,e} - T_{l,s}}{s_n} \quad (23)$$

A temperatura da água nos vários incrementos da torre é dada pela seguinte equação,

$$T_{l,s_n} = T_{l,s} + (dT_l * s_n) \quad (24)$$

4.1.2. -Entalpia do ar num incremento de volume

Para o cálculo da entalpia do ar em cada secção, utilizou-se um processo semelhante ao aplicado para calcular a temperatura em cada secção.

A entalpia do ar num incremento de volume depende da entalpia do ar à entrada da torre, diferença das entalpias entre incrementos e do número de secções, calculando-se pela seguinte expressão,

$$h_{g,s_n} = h_{B3} + (dh_g * s_n) \quad (25)$$

Reformulando a equação 17 de forma a calcular a variação entálpica do escoamento de ar, obteve-se a seguinte expressão,

$$dh_g = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} * c_{p_l} * dT_l \quad (26)$$

4.1.3. -Entalpia do ar saturado num incremento de volume

A figura 14 representa graficamente a evolução da entalpia do ar saturado, h_{gs} , em função da temperatura da água

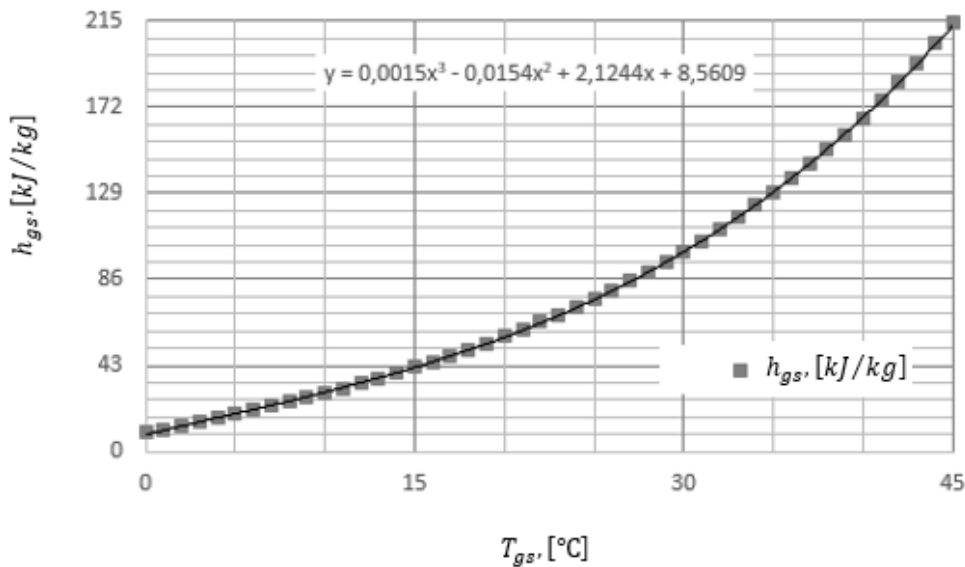


Figura 14 - Entalpia do ar saturado

A correlação seguinte, obtida a partir da linha de tendência, permitiu calcular os valores da entalpia do ar saturado em função da temperatura do escoamento de água,

$$h_{gs} = 0,0015 * T_{gs}^3 - 0,0154 * T_{gs}^2 + 2,124 * T_{gs} + 8,56 \quad (27)$$

Determinou-se a temperatura média do escoamento de água através da média aritmética das temperaturas da presente seção e da que a sucede.

$$T_{l\ med,s_n,n+1} = \frac{T_{l,s_n} + T_{l,s_{n+1}}}{2} \quad (28)$$

Determinou-se a entalpia média do escoamento de ar através da média aritmética das entalpias da presente seção e da que a sucede.

$$h_{l\ med,s_n,n+1} = \frac{h_{l,s_n} + h_{l,s_{n+1}}}{2} \quad (29)$$

Determinou-se a entalpia média do ar saturado através da média aritmética das entalpias da presente secção e da que a sucede.

$$h_{gs\ med,s_n,n+1} = \frac{h_{gs,s_n} + h_{gs,s_{n+1}}}{2} \quad (30)$$

4.1.4. – Determinação do parâmetro característico

❖ Ensaio 1

Dividiu-se a torre de arrefecimento em 10 incrementos de volume. Substituindo os valores das temperaturas médias da água à entrada e à saída da torre, medidas pelos termopares, na equação 23, obteve-se uma queda na temperatura da água de 0,587 °C em cada secção.

Conhecido o caudal de água, o caudal de ar e a diferença de temperatura da água, calculou-se a diferença entálpica do ar através da equação 26, obtendo-se uma diferença de 3,77 kJ/kg, em cada secção.

A entálpia do ar saturado de cada incremento de volume obteve-se através da equação 27.

Na tabela 11 encontram-se os valores da temperatura da água, da entálpia do ar e da entálpia do ar saturado de cada incremento de volume.

Tabela 11 - Ensaio 1 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	22,1	41,1	64,7
1	22,7	44,9	66,9
2	23,3	48,7	69,1
3	23,9	52,4	71,4
4	24,5	56,2	73,8
5	25,1	60,0	76,2
6	25,7	63,8	78,7
7	26,2	67,5	81,3

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
8	26,8	71,3	83,9
9	27,4	75,1	86,7
10	28,0	78,8	89,4

Na tabela 12, apresentam-se os valores da temperatura média da água, calculada pela equação 28, a entálpia média do ar, calculada através da equação 29, a entálpia média do ar saturado, calculada pela equação 31. A penúltima coluna da tabela apresenta os valores da diferença média entálpica e a última coluna apresenta o inverso dessa diferença.

Tabela 12 - Ensaio 1 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{gs\ med,s_n,n+1}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	22,4	43,0	65,8	22,8	0,044
1-2	23,0	46,8	68,0	21,2	0,047
2-3	23,6	50,6	70,3	19,7	0,051
3-4	24,2	54,3	72,6	18,3	0,055
4-5	24,8	58,1	75,0	16,9	0,059
5-6	25,4	61,9	77,5	15,6	0,064
6-7	25,9	65,6	80,0	14,4	0,070
7-8	26,5	69,4	82,6	13,2	0,076
8-9	27,1	73,2	85,3	12,1	0,082
9-10	27,7	77,0	88,1	11,1	0,090

❖ Ensaio 2

Para o ensaio 2 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,694 \text{ °C}$$

$$dh_g = 3,84 \text{ kJ/kg}$$

A tabela 13 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 2.

Tabela 13 - Ensaio 2 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	21,6	41,3	62,7
1	22,3	45,1	65,3
2	23,0	49,0	67,9
3	23,7	52,8	70,5
4	24,4	56,7	73,3
5	25,0	60,5	76,2
6	25,7	64,3	79,1
7	26,4	68,2	82,2
8	27,1	72,0	85,4
9	27,8	75,9	88,6
10	28,5	79,7	92,0

Na tabela 14, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 2.

Tabela 14 - Ensaio 2 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{gs\ med,s_n,n+1}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	21,9	43,2	64,0	20,8	0,048
1-2	22,6	47,0	66,6	19,5	0,051
2-3	23,3	50,9	69,2	18,3	0,055
3-4	24,0	54,7	71,9	17,2	0,058
4-5	24,7	58,6	74,7	16,2	0,062
5-6	25,4	62,4	77,7	15,2	0,066
6-7	26,1	66,3	80,7	14,4	0,069
7-8	26,8	70,1	83,8	13,7	0,073
8-9	27,5	74,0	87,0	13,0	0,077
9-10	28,2	77,8	90,3	12,5	0,080

❖ Ensaio 3

Para o ensaio 3 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,763 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 3,90 \text{ kJ/kg}$$

A tabela 15 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 3.

Tabela 15 - Ensaio 3 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	21,5	41,5	62,4
1	22,2	45,4	65,1
2	23,0	49,3	68,0
3	23,8	53,2	71,0
4	24,5	57,1	74,0
5	25,3	61,0	77,2
6	26,1	64,9	80,5
7	26,8	68,8	83,9
8	27,6	72,7	87,5
9	28,3	76,6	91,1
10	29,1	80,5	94,9

Na tabela 16, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 3.

Tabela 16 - Ensaio 3 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	21,9	43,4	63,7	20,3	0,049
1-2	22,6	47,3	66,6	19,2	0,052
2-3	23,4	51,2	69,5	18,2	0,055
3-4	24,1	55,1	72,5	17,3	0,058
4-5	24,9	59,0	75,6	16,6	0,060
5-6	25,7	62,9	78,9	15,9	0,063
6-7	26,4	66,8	82,2	15,4	0,065
7-8	27,2	70,7	85,7	14,9	0,067
8-9	28,0	74,6	89,3	14,6	0,068
9-10	28,7	78,5	93,0	14,5	0,069

❖ Ensaio 4

Para o ensaio 4 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,799 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 3,75 \text{ kJ/kg}$$

A tabela 17 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 4.

Tabela 17 - Ensaio 4 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	21,3	42,6	61,9
1	22,1	46,4	64,7
2	22,9	50,1	67,7
3	23,7	53,9	70,8
4	24,5	57,6	74,0
5	25,3	61,4	77,4
6	26,1	65,1	80,8
7	26,9	68,9	84,4
8	27,7	72,6	88,2
9	28,5	76,4	92,0
10	29,3	80,1	96,0

Na tabela 18, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 4.

Tabela 18 - Ensaio 4 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l \text{ med},s_n,n+1}$	$h_{l \text{ med},s_n,n+1}$	$h_{gs \text{ med},s_n,n+1}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	21,7	44,5	63,3	18,8	0,053
1-2	22,5	48,3	66,2	18,0	0,056
2-3	23,3	52,0	69,3	17,3	0,058

Secções	$T_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{gs\ med,s_n,n+1}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
3-4	24,1	55,8	72,4	16,7	0,060
4-5	24,9	59,5	75,7	16,2	0,062
5-6	25,7	63,3	79,1	15,8	0,063
6-7	26,5	67,0	82,6	15,6	0,064
7-8	27,3	70,8	86,3	15,5	0,064
8-9	28,1	74,5	90,1	15,6	0,064
9-10	28,9	78,3	94,0	15,8	0,063

❖ Ensaio 5

Para o ensaio 5 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,588\text{ °C}$$

$$dh_g = 6,75\text{ kJ/kg}$$

A tabela 19 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 5.

Tabela 19 - Ensaio 5 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	27,9	42,5	89,0
1	28,5	49,2	91,9
2	29,1	55,9	94,8
3	29,7	62,7	97,8
4	30,3	69,4	100,9
5	30,9	76,2	104,1
6	31,4	82,9	107,4
7	32,0	89,7	110,7
8	32,6	96,4	114,2
9	33,2	103,2	117,7
10	33,8	109,9	121,3

Na tabela 20, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 5.

Tabela 20 - Ensaio 5 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	28,2	45,8	90,5	44,6	0,022
1-2	28,8	52,6	93,4	40,8	0,025
2-3	29,4	59,3	96,3	37,0	0,027
3-4	30,0	66,1	99,4	33,3	0,030
4-5	30,6	72,8	102,5	29,7	0,034
5-6	31,1	79,6	105,7	26,2	0,038
6-7	31,7	86,3	109,1	22,8	0,044
7-8	32,3	93,0	112,4	19,4	0,052
8-9	32,9	99,8	115,9	16,1	0,062
9-10	33,5	106,5	119,5	13,0	0,077

❖ Ensaio 6

Para o ensaio 6 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,674\ ^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 6,67\ \text{kJ/kg}$$

A tabela 21 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 6.

Tabela 21 - Ensaio 6 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	27,3	42,4	86,2
1	28,0	49,1	89,4
2	28,7	55,8	92,7
3	29,3	62,5	96,1
4	30,0	69,1	99,6
5	30,7	75,8	103,2
6	31,4	82,5	107,0
7	32,0	89,2	110,8

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
8	32,7	95,8	114,8
9	33,4	102,5	118,8
10	34,1	109,2	123,0

Na tabela 22, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 6.

Tabela 22 – Ensaio 6 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{gs\ med,s_n,n+1}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	27,7	45,8	87,8	42,1	0,024
1-2	28,3	52,5	91,1	38,6	0,026
2-3	29,0	59,1	94,4	35,3	0,028
3-4	29,7	65,8	97,9	32,1	0,031
4-5	30,4	72,5	101,4	29,0	0,035
5-6	31,0	79,1	105,1	26,0	0,039
6-7	31,7	85,8	108,9	23,1	0,043
7-8	32,4	92,5	112,8	20,3	0,049
8-9	33,1	99,2	116,8	17,6	0,057
9-10	33,7	105,8	120,9	15,1	0,066

❖ Ensaio 7

Para o ensaio 7 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,742\ ^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 6,78\ \text{kJ/kg}$$

A tabela 23 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 7.

Tabela 23 - Ensaio 7 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	27,0	42,4	84,7
1	27,7	49,2	88,2
2	28,5	56,0	91,8
3	29,2	62,8	95,5
4	30,0	69,5	99,4
5	30,7	76,3	103,3
6	31,5	83,1	107,4
7	32,2	89,9	111,7
8	32,9	96,7	116,1
9	33,7	103,4	120,6
10	34,4	110,2	125,3

Na tabela 24, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 7.

Tabela 24 - Ensaio 7 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{l\ med,s_n,n+1}$	$h_{gs\ med,s_n,n+1}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	27,4	45,8	86,5	40,7	0,025
1-2	28,1	52,6	90,0	37,4	0,027
2-3	28,9	59,4	93,7	34,3	0,029
3-4	29,6	66,2	97,4	31,3	0,032
4-5	30,3	72,9	101,3	28,4	0,035
5-6	31,1	79,7	105,4	25,7	0,039
6-7	31,8	86,5	109,6	23,1	0,043
7-8	32,6	93,3	113,9	20,6	0,049
8-9	33,3	100,1	118,3	18,3	0,055
9-10	34,1	106,8	122,9	16,1	0,062

❖ Ensaio 8

Para o ensaio 8 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,799 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 6,70 \text{ kJ/kg}$$

A tabela 25 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 8.

Tabela 25 - Ensaio 8 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	26,1	39,4	80,7
1	26,9	46,1	84,3
2	27,7	52,8	88,0
3	28,5	59,5	91,9
4	29,3	66,2	95,9
5	30,1	72,9	100,0
6	30,9	79,6	104,3
7	31,7	86,3	108,8
8	32,5	93,0	113,4
9	33,3	99,7	118,2
10	34,1	106,4	123,2

Na tabela 26, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 8.

Tabela 26 - Ensaio 8 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	26,5	42,7	82,5	39,8	0,025
1-2	27,3	49,4	86,1	36,7	0,027
2-3	28,1	56,1	89,9	33,8	0,030
3-4	28,9	62,8	93,9	31,0	0,032
4-5	29,7	69,5	97,9	28,4	0,035
5-6	30,5	76,2	102,2	25,9	0,039
6-7	31,3	82,9	106,5	23,6	0,042
7-8	32,1	89,6	111,1	21,5	0,047
8-9	32,9	96,3	115,8	19,5	0,051

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
9-10	33,7	103,0	120,7	17,7	0,057

❖ Ensaio 9

Para o ensaio 9 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,594\ ^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 5,31\ \text{kJ/kg}$$

A tabela 27 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 9.

Tabela 27 - Ensaio 9 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento, divisão em 10 incrementos

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	25,1	42,7	76,3
1	25,7	48,0	78,9
2	26,3	53,3	81,5
3	26,9	58,7	84,2
4	27,5	64,0	86,9
5	28,1	69,3	89,7
6	28,7	74,6	92,6
7	29,2	79,9	95,6
8	29,8	85,2	98,7
9	30,4	90,5	101,8
10	31,0	95,9	105,1

Na tabela 28, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 9.

Tabela 28 - Ensaio 9 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	25,4	45,4	77,6	32,2	0,031
1-2	26,0	50,7	80,2	29,5	0,034
2-3	26,6	56,0	82,8	26,8	0,037
3-4	27,2	61,3	85,5	24,2	0,041
4-5	27,8	66,6	88,3	21,7	0,046
5-6	28,4	71,9	91,2	19,2	0,052
6-7	28,9	77,3	94,1	16,9	0,059
7-8	29,5	82,6	97,2	14,6	0,069
8-9	30,1	87,9	100,3	12,4	0,081
9-10	30,7	93,2	103,5	10,2	0,098

❖ Ensaio 10

Para o ensaio 10 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,636\ ^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 4,91\ \text{kJ/kg}$$

A tabela 29 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 10.

Tabela 29 - Ensaio 10 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	24,2	43,0	72,5
1	24,8	47,9	75,1
2	25,4	52,8	77,8
3	26,1	57,7	80,5
4	26,7	62,6	83,4
5	27,3	67,5	86,3
6	28,0	72,5	89,3
7	28,6	77,4	92,4
8	29,2	82,3	95,6

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
9	29,9	87,2	98,9
10	30,5	92,1	102,3

Na tabela 30, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 10.

Tabela 30 - Ensaio 10 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	24,5	45,4	73,8	28,3	0,035
1-2	25,1	50,4	76,4	26,1	0,038
2-3	25,7	55,3	79,2	23,9	0,042
3-4	26,4	60,2	81,9	21,8	0,046
4-5	27,0	65,1	84,8	19,7	0,051
5-6	27,7	70,0	87,8	17,8	0,056
6-7	28,3	74,9	90,9	15,9	0,063
7-8	28,9	79,8	94,0	14,2	0,071
8-9	29,6	84,7	97,2	12,5	0,080
9-10	30,2	89,6	100,6	10,9	0,091

❖ Ensaio 11

Para o ensaio 11 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,715\ ^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 5,09\ \text{kJ/kg}$$

A tabela 31 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 11.

Tabela 31 - Ensaio 11 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	24,1	43,0	72,2
1	24,8	48,1	75,1
2	25,5	53,2	78,1
3	26,2	58,3	81,2
4	26,9	63,4	84,4
5	27,6	68,5	87,7
6	28,4	73,6	91,2
7	29,1	78,7	94,7
8	29,8	83,8	98,4
9	30,5	88,8	102,2
10	31,2	93,9	106,1

Na tabela 132, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 11.

Tabela 32 - Ensaio 11 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	24,4	45,6	73,6	28,1	0,036
1-2	25,1	50,6	76,6	25,9	0,039
2-3	25,9	55,7	79,6	23,9	0,042
3-4	26,6	60,8	82,8	22,0	0,045
4-5	27,3	65,9	86,1	20,2	0,050
5-6	28,0	71,0	89,5	18,4	0,054
6-7	28,7	76,1	93,0	16,9	0,059
7-8	29,4	81,2	96,6	15,4	0,065
8-9	30,1	86,3	100,3	14,0	0,071
9-10	30,9	91,4	104,2	12,8	0,078

❖ Ensaio 12

Para o ensaio 12 obteve-se os seguintes valores para a diferença da temperatura da água e da variação entálpica do escoamento do ar.

$$dT_l = 0,777 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$dh_g = 5,08 \text{ kJ/kg}$$

A tabela 33 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento ao longo do ensaio 12.

Tabela 33 - Ensaio 12 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	23,9	42,7	71,4
1	24,7	47,8	74,5
2	25,4	52,9	77,8
3	26,2	58,0	81,2
4	27,0	63,0	84,7
5	27,8	68,1	88,3
6	28,5	73,2	92,1
7	29,3	78,3	96,0
8	30,1	83,4	100,0
9	30,9	88,4	104,2
10	31,6	93,5	108,5

Na tabela 34, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção ao longo do ensaio 12.

Tabela 34 - Ensaio 12 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	24,3	45,2	73,0	27,7	0,036
1-2	25,0	50,3	76,2	25,8	0,039
2-3	25,8	55,4	79,5	24,1	0,042
3-4	26,6	60,5	82,9	22,4	0,045
4-5	27,4	65,6	86,5	20,9	0,048
5-6	28,2	70,7	90,2	19,5	0,051
6-7	28,9	75,7	94,0	18,3	0,055
7-8	29,7	80,8	98,0	17,2	0,058
8-9	30,5	85,9	102,1	16,2	0,062

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
9-10	31,3	91,0	106,4	15,4	0,065

A tabela seguinte apresenta os valores do somatório do inverso da diferença média entálpica e os valores do parâmetro característico da torre de arrefecimento.

Conhecido o caudal de água, a diferença de temperaturas da água e o somatório do inverso da diferença média entálpica de cada ensaio, calculou-se o parâmetro característico da torre de arrefecimento através da equação 22.

Tabela 35 - Parâmetro característico da torre de arrefecimento

Ensaio	\dot{m}_l	dT_l	$\sum 1/(h_{gs} - h_l)_m$	δ
	[kg/s]	[°C]	[kg/kJ]	[kW/(kJ/kg)]
Ensaio 1	0,161	0,587	0,635	0,251
Ensaio 2	0,139	0,694	0,637	0,256
Ensaio 3	0,128	0,763	0,605	0,247
Ensaio 4	0,118	0,799	0,606	0,238
Ensaio 5	0,161	0,588	0,409	0,162
Ensaio 6	0,139	0,674	0,397	0,155
Ensaio 7	0,128	0,742	0,395	0,157
Ensaio 8	0,118	0,799	0,384	0,151
Ensaio 9	0,161	0,594	0,545	0,218
Ensaio 10	0,139	0,636	0,570	0,210
Ensaio 11	0,128	0,715	0,537	0,206
Ensaio 12	0,118	0,777	0,497	0,190

Conhecidos os valores do parâmetro característico para os vários casos simulados experimentalmente, pretende-se calcular os valores de δ para valores de caudais de ar e água diferentes.

Como já tinha sido referido anteriormente durante os ensaios manteve-se o registo de ar na mesma posição ao longo dos ensaios de forma a garantir um escoamento de ar constante no interior da torre. No entanto, apesar de se ter mantido o registo na mesma posição o escoamento não se manteve totalmente constante. De forma a manter o caudal de ar constante calculou-se a média aritmética do mesmo.

Tabela 36 - Caudal médio de ar

Ensaio	γ	\dot{m}_g	\dot{m}_l	δ
		[kg/s]	[kg/s]	[kW/(kJ/kg)]
Ensaio 1	a	0,105	0,161	0,251
Ensaio 2	a	0,105	0,139	0,256
Ensaio 3	a	0,105	0,128	0,247
Ensaio 4	a	0,105	0,118	0,238
Ensaio 5	b	0,059	0,161	0,162
Ensaio 6	b	0,059	0,139	0,155
Ensaio 7	b	0,059	0,128	0,157
Ensaio 8	b	0,059	0,118	0,151
Ensaio 9	c	0,075	0,161	0,218
Ensaio 10	c	0,075	0,139	0,210
Ensaio 11	c	0,075	0,128	0,206
Ensaio 12	c	0,075	0,118	0,190

O parâmetro β é o inverso do parâmetro característico cuja dependência pelos caudais de água e de ar pode ser observado na figura 16. Cada linha de tendência traçada em função dos valores do parâmetro β e do caudal de água representa um valor do caudal de ar particular.

A tabela com os valores de β utilizados para representar o gráfico pode ser consultada no Anexo III.

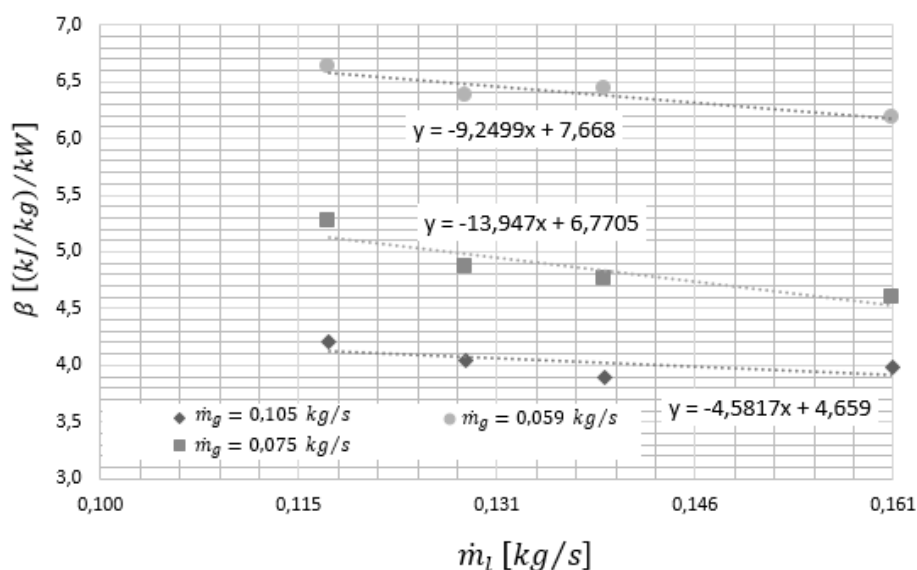


Figura 15 – Dependência do parâmetro β relativamente ao caudal de água para valores particulares do caudal de ar

A correlação obtida através da linha de tendência para um caudal de ar de 0,059 kg/s é a seguinte,

$$\beta_c = -9,2499 * \dot{m}_l + 7,668 \quad (31)$$

A correlação obtida através da linha de tendência para um caudal de ar de 0,075 kg/s é a seguinte,

$$\beta_b = -13,947 * \dot{m}_l + 6,7705 \quad (32)$$

A correlação obtida através da linha de tendência para um caudal de ar de 0,105 kg/s é a seguinte,

$$\beta_a = -4,5817 * \dot{m}_l + 4,659 \quad (33)$$

De forma a se obter valores do parâmetro β mais próximas da linha de tendência traçada voltou-se a calcular os valores do parâmetro em função do caudal de água medido experimentalmente, os valores do mesmo apresentam-se na tabela

Tabela 37 - Parâmetro β para caudais de água e ar particulares

Ensaio	\dot{m}_l [kg/s]	\dot{m}_g [kg/s]	β [(kJ/kg)/kW]
Ensaio 1	0,161	0,105	3,92
Ensaio 2	0,139	0,105	4,02
Ensaio 3	0,128	0,105	4,07
Ensaio 4	0,118	0,105	4,12
Ensaio 5	0,161	0,059	6,26
Ensaio 6	0,139	0,059	6,26
Ensaio 7	0,128	0,059	6,26
Ensaio 8	0,118	0,059	6,26
Ensaio 9	0,161	0,075	4,55
Ensaio 10	0,139	0,075	4,55
Ensaio 11	0,128	0,075	4,55
Ensaio 12	0,118	0,075	4,55

Traçou-se um novo gráfico, figura 17, com os valores do parâmetro β , calculado através das correlações, em função do inverso do caudal de ar, $1/\dot{m}_g$ e do caudal de água.

Ao contrário do gráfico anteriormente apresentado, figura 16, as curvas representadas na figura 17 remetem para valores particulares do caudal de água obtidos experimentalmente. As correlações obtidas através das curvas de tendência permitiram o cálculo do parâmetro β e posteriormente do parâmetro característico, δ , para diferentes condições das que forma obtidas experimentalmente.

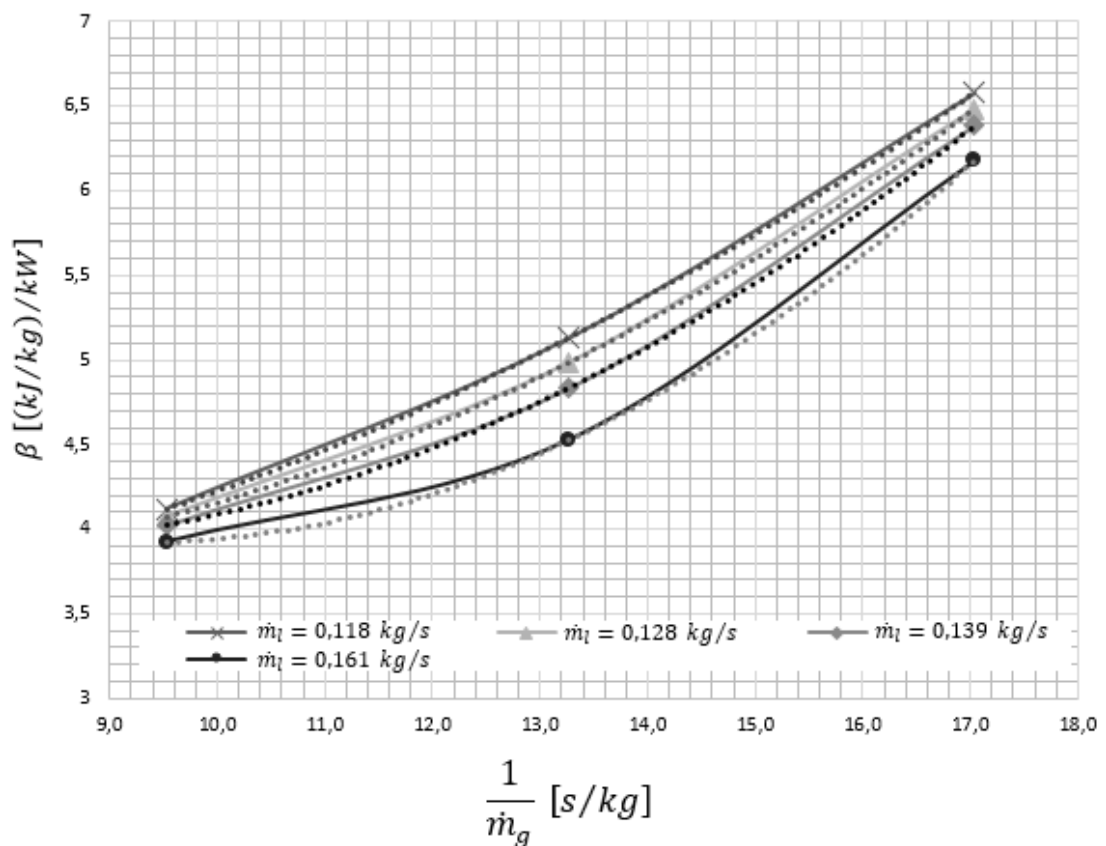


Figura 16 - Dependência do parâmetro β relativamente ao caudal de ar para valores particulares do caudal de água

A correlação obtida através da linha de tendência para um caudal de água de $0,161 \text{ kg/s}$ é a seguinte,

$$\beta_A = 0,0369 * \left(\frac{1}{\dot{m}_g}\right)^2 - 0,6791 * \frac{1}{\dot{m}_g} + 7,0451 \quad (34)$$

A correlação obtida através da linha de tendência para um caudal de água de 0,139 kg/s é a seguinte,

$$\beta_B = 0,0259 * \left(\frac{1}{\dot{m}_g}\right)^2 - 0,3727 * \frac{1}{\dot{m}_g} + 5,2272 \quad (35)$$

A correlação obtida através da linha de tendência para um caudal de água de 0,128 kg/s é a seguinte,

$$\beta_C = 0,0205 * \left(\frac{1}{\dot{m}_g}\right)^2 - 0,2243 * \frac{1}{\dot{m}_g} + 4,3471 \quad (36)$$

A correlação obtida através da linha de tendência para um caudal de água de 0,118 kg/s é a seguinte,

$$\beta_D = 0,0153 * \left(\frac{1}{\dot{m}_g}\right)^2 - 0,0785 * \frac{1}{\dot{m}_g} + 3,4821 \quad (37)$$

Uma vez conhecidas as equações para o cálculo do parâmetro β em função de um determinado caudal de ar de água, calculou-se o parâmetro característico para pontos distintos daqueles que já haviam sido calculados.

A grelha abaixo, figura 19, apresenta os valores do parâmetro característico calculados para os casos simulados experimentalmente.

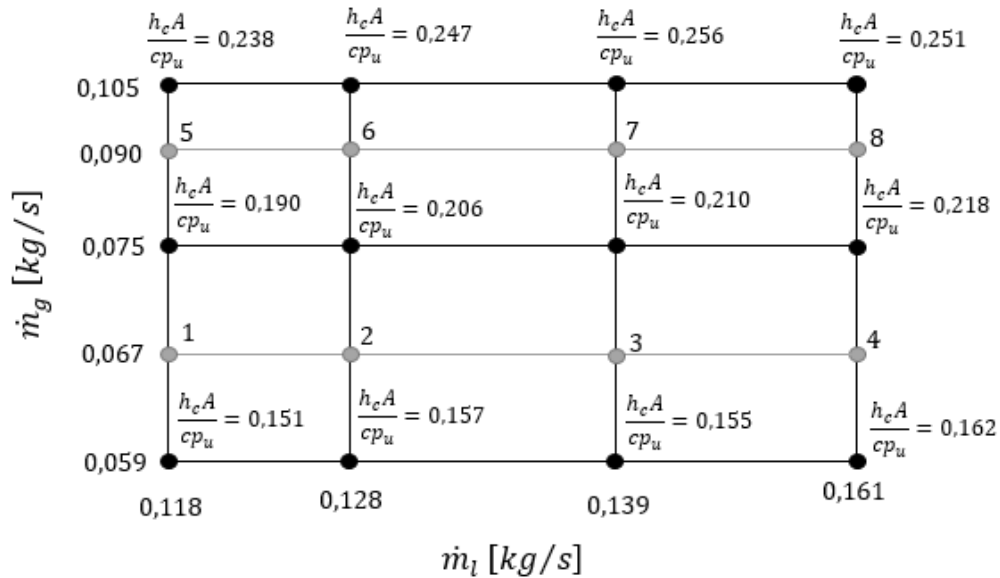


Figura 17 -valores de δ para cada um dos ensaios

Os pontos intermédios representados na grelha pela cor cinzenta são os pontos em que não é conhecido o parâmetro característico.

Estes de pontos de funcionamento da torre de arrefecimento apresentam um caudal de ar diferente daqueles que foram obtidos através dos ensaios, no entanto apresentam os mesmos caudais de água. Sendo assim calculou-se o parâmetro característico respetivo a cada condição de funcionamento através das equações acima enunciadas.

Na tabela seguinte, tabela 36, apresentam-se os valores de β e os valores do parâmetro característico para os pontos representados na grelha de caudais, figura 19.

Tabela 38 - Parâmetro Característico das condições intermédias com o caudal de água igual

Pontos	\dot{m}_l	\dot{m}_g	β	δ
	[kg/s]	[kg/s]	[(kJ/kg)/kW]	[kW/(kJ/kg)]
1	0,118	0,067	5,74	0,174
2	0,128	0,067	5,60	0,178
3	0,139	0,067	5,46	0,183
4	0,161	0,067	5,16	0,194
5	0,118	0,090	4,50	0,222
6	0,128	0,090	4,39	0,228
7	0,139	0,090	4,28	0,234
8	0,161	0,090	4,05	0,247

Após conhecidos os valores do parâmetro característico para os pontos com o mesmo caudal de água, pretende-se conhecer o parâmetro característico para os pontos de funcionamento em que o caudal de água é diferente dos caudais que regem as equações anteriormente obtidas, figura 20.

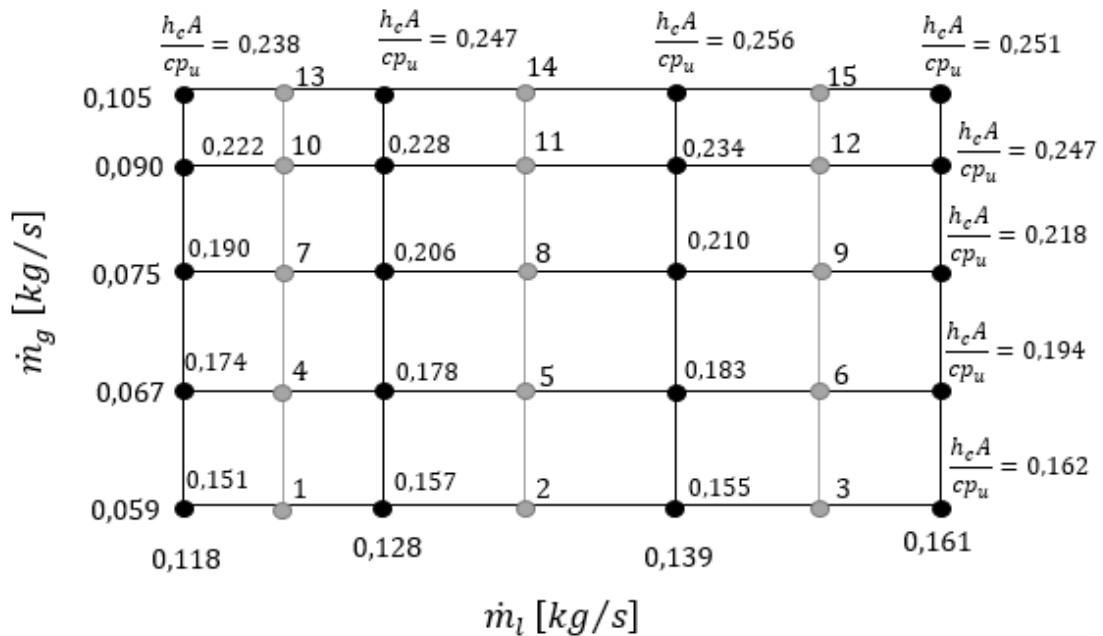


Figura 18 – valores de δ para pontos distintos obtidos experimentalmente

Apesar de os caudais não se encontrarem nas condições pelas quais as equações foram obtidas, os caudais devem-se manter dentro do intervalo dos caudais de água obtidos experimentalmente, $\dot{m}_l \in [0,118 ; 0,161 \text{ kg/s}]$.

Utilizando o ponto 1 como exemplo, assumindo que o caudal deste ponto se encontra a meio dos outros dois caudais, $\dot{m}_{l_1} = 0,123 \text{ kg/s}$ e que o caudal de ar é igual para todos os pontos da mesma linha.

Representando o graficamente as equações pertencentes aos caudais de água, $\dot{m}_l = 0,118 \text{ kg/s}$ e $\dot{m}_l = 0,128 \text{ kg/s}$, figura 21.

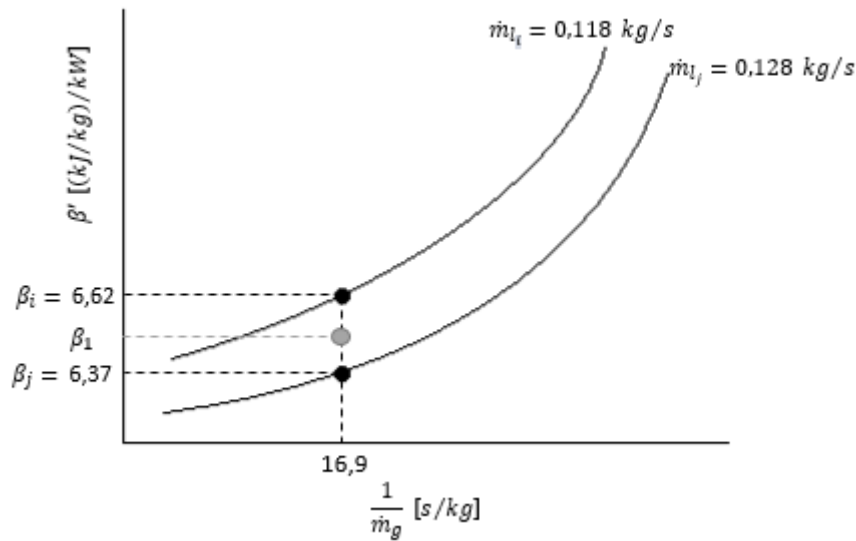


Figura 19 - Interpolação linear para o cálculo do β

Uma vez que o caudal de ar é igual nos três pontos acima representados, figura 21, e que os valores de β para os caudais de água, $\dot{m}_l = 0,118 \text{ kg/s}$ e $\dot{m}_l = 0,128 \text{ kg/s}$, calculou-se o β_1 através de uma interpolação linear de valores, expressa da seguinte forma,

$$\beta = \frac{(\beta_i - \beta_j) * (\dot{m}_{l_i} - \dot{m}_{l_j})}{(\dot{m}_{l_i} - \dot{m}_{l_j})} + \beta_j \quad (38)$$

Substituindo β_i e β_j , pelas equações 37 e 36, respetivamente, e simplificando obteve-se a equação para o cálculo de β para caudais compreendidos entre os seguintes caudais, $\dot{m}_l \in [0,118 ; 0,128 \text{ kg/s}]$

$$\beta_1 = \frac{(-0,0052 * (1/\dot{m}_g)^2 + 0,146 * (1/\dot{m}_g) - 0,865) * (\dot{m}_l - \dot{m}_{l_j})}{(\dot{m}_{l_i} - \dot{m}_{l_j})} + \quad (39)$$

$$+ 0,0205 * (1/\dot{m}_g)^2 - 0,224 * (1/\dot{m}_g) + 4,35$$

Procedendo da mesma forma, substituindo as equações (32) e (33) na equação (35) e simplificando obteve-se a equação para o cálculo de β para caudais compreendidos entre os seguintes caudais, $\dot{m}_l \in [0,128 ; 0,139 \text{ kg/s}]$

$$\beta_1 = \frac{(-0,0054 * (1/\dot{m}_g)^2 + 0,148 * (1/\dot{m}_g) - 0,880) * (\dot{m}_l - \dot{m}_{l_j})}{(\dot{m}_{l_i} - \dot{m}_{l_j})} +$$

$$+0,0259 * (1/\dot{m}_g)^2 - 0,373 * (1/\dot{m}_g) + 5,23 \quad (40)$$

Procedendo da igual forma, substituindo as equações (31) e (32) na equação (35) e simplificando obteve-se a equação para o calculo de β para caudais compreendidos entre os seguintes caudais, $\dot{m}_l \in [0,139 ; 0,161 \text{ kg/s}]$

$$\beta_1 = \frac{(-0,011 * (1/\dot{m}_g)^2 + 0,306 * (1/\dot{m}_g) - 1,82) * (\dot{m}_l - \dot{m}_{l_j})}{(\dot{m}_{l_i} - \dot{m}_{l_j})} +$$

$$+0,037 * (1/\dot{m}_g)^2 - 0,679 * (1/\dot{m}_g) + 7,05 \quad (41)$$

Assumindo um caudal de água, $\dot{m}_l = 0,134 \text{ kg/s}$, para os pontos 2, 5, 8, 11 e 12, e um caudal $\dot{m}_l = 0,150 \text{ kg/s}$ para os pontos 3, 6, 9, 12 e 15.

Calculou-se os valores do parâmetro característico dos restantes pontos, figura 20, de igual forma, através da interpolação linear e entre os valores do caudal de ar e de β . Os valores dos parâmetros característicos podem ser consultados na tabela seguinte.

Tabela 39 - Parâmetro Característico para um caudal de água diferente do caudal de água medido

Pontos	\dot{m}_l	\dot{m}_g	β	δ
	[kg/s]	[kg/s]	[(kJ/kg)/kW]	[kW/(kJ/kg)]
1	0,123	0,059	6,49	0,154
2	0,134	0,059	6,39	0,157
3	0,150	0,059	6,23	0,161
4	0,123	0,067	5,64	0,177
5	0,134	0,067	5,49	0,182
6	0,150	0,067	5,27	0,190
7	0,123	0,075	5,08	0,197
8	0,134	0,075	4,93	0,203
9	0,150	0,075	4,70	0,213
10	0,123	0,090	4,44	0,225
11	0,134	0,090	4,33	0,231
12	0,150	0,090	4,16	0,240
13	0,123	0,105	4,10	0,244

Pontos	\dot{m}_l	\dot{m}_g	β	δ
	[kg/s]	[kg/s]	[(kJ/kg)/kW]	[kW/(kJ/kg)]
14	0,134	0,105	4,05	0,247
15	0,150	0,105	3,97	0,252

4.1.5. – Previsão das condições de saída da torre

Uma vez conhecidos os valores do caudal de ar e água, do parâmetro característico, $h_c * A/cp_u$, e admitindo as condições de entrada da torre de arrefecimento foi possível prever as condições de saída da torre de arrefecimento. O processo para o cálculo das condições não foi direto pois teve-se de recorrer a um processo iterativo.

Como não é conhecida a temperatura à saída da torre de arrefecimento admitiu-se um primeiro valor calculando-se um novo valor de $h_c * A/cp_u$. Caso o valor resultante de $h_c * A/cp_u$ for superior ao valor real do parâmetro característico anteriormente obtido, a temperatura admitida à saída da torre tem de ser aumentada, caso o valor seja inferior a temperatura admitida à saída da torre tem de ser menor.

Manteve-se a torre de arrefecimento dividida em 10 incrementos de volume e utilizou-se os valores de $h_c * A/cp_u$ calculados anteriormente, para caudais de ar e água diferentes dos medidos nos ensaios.

Utilizando como exemplo os valores dos caudais de ar e água e do parâmetro característico do ponto 1 apresentado na tabela 39 e admitindo uma temperatura da água à entrada $T_{l,e} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabela 40 - Previsão das condições de saída da torre de arrefecimento

	1º Iteração	2º Iteração	3º Iteração
\dot{m}_g [kg/s]	0,123	0,123	0,123
\dot{m}_g [kg/s]	0,059	0,059	0,059
$T_{l,e}$ [°C]	34	34	23,1
$T_{g,e}$ [°C]	30,0	30,0	30,0
$T_{g,s}$ [°C]	27	26,5	26,43
$h_c A/cp_u$ [kW/(kJ/kg)]	0,121	0,149	0,154

Conhecidas as condições à entrada da torre foi possível prever as condições ao longo da torre por cada incremento de volume calculadas de forma idêntica às calculadas anteriormente para cada ensaio.

A tabela 41 mostra os valores da diferença de temperatura da água, a variação entálpica do ar e do ar saturado para cada incremento.

Tabela 41 - Temperatura da água, entalpia do ar e do ar saturado por incremento

Incrementos	T_{l,s_n} [°C]	h_{g,s_n} [kJ/kg]	h_{gs} [kJ/kg]
0	26,5	40,9	82,5
1	27,3	47,5	85,9
2	28,0	54,0	89,4
3	28,8	60,5	93,1
4	29,5	67,1	96,9
5	30,3	73,6	100,8
6	31,0	80,1	104,9
7	31,8	86,7	109,1
8	32,5	93,2	113,5
9	33,3	99,8	118,0
10	34,0	106,3	122,6

Na tabela 42, apresentam-se os valores da temperatura média da água, a entálpia média do ar, a entálpia média do ar saturado, os valores da diferença média entálpica e o inverso dessa mesma diferença de cada seção.

Tabela 42 - Temperatura média da água, entalpia média do ar e do ar saturado, diferença média entálpica

Secções	$T_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{l\ med,s_{n,n+1}}$	$h_{gs\ med,s_{n,n+1}}$	$(h_{gs} - h_l)_m$	$1/(h_{gs} - h_l)_m$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kg/kJ]
0-1	26,9	44,2	84,2	40,0	0,025
1-2	27,6	50,7	87,7	36,9	0,027
2-3	28,4	57,3	91,3	34,0	0,029
3-4	29,1	63,8	95,0	31,2	0,032
4-5	29,9	70,3	98,9	28,5	0,035
5-6	30,6	76,9	102,9	26,0	0,038
6-7	31,4	83,4	107,0	23,6	0,042
7-8	32,1	89,9	111,3	21,3	0,047
8-9	32,9	96,5	115,7	19,2	0,052
9-10	33,6	103,0	120,3	17,27	0,058

5. – Conclusão

O presente estudo teve como procedimento experimental a realização de ensaios numa torre de arrefecimento com os escoamentos em contra corrente. Cada ensaio teve a duração de cerca de 10 minutos para garantir que ao longo do ensaio a torre atingia as condições de regime permanente.

Dos ensaios que foram realizados foram medidas e armazenadas a evolução das temperaturas do escoamento de água e ar através de termopares localizados ao longo da torre, no entanto para a realização dos cálculos ao longo deste trabalho foram consideradas as temperaturas médias do últimos 20 registo medidos pelos termopares.

O caudal de água foi obtido experimentalmente através da posição do flutuador presenta no banco de ensaios, por outro lado o caudal de ar foi determinado através de uma equação de balanço.

De forma a simplificar os cálculos e a dedução do modelo numérico desprezou-se o caudal de evaporação.

O modelo numérico teve como ponto de partida o cálculo do $\frac{h_c d A}{c p_u}$ para as condições obtidas experimentalmente de forma a posteriormente se obter correlações para o cálculo do parâmetro característico para condições diferentes daquelas que foram obtidas nos ensaios.

As correlações obtidas para o cálculo do parâmetro β , inverso do $\frac{h_c d A}{c p_u}$, dependem do valor do inverso do caudal de ar e de um valor particular do caudal de água.

Quando as condições de funcionamento têm um caudal de água idêntico ao medido durante os ensaios o parâmetro β de forma direta através das correlações por outro quando as condições de funcionamento têm valores de caudal diferentes daqueles que foram obtidos experimentalmente é necessário recorrer a uma interpolação linear para calcular o parâmetro β .

Através da grelha de valores do parâmetro característico, figura 18, pode-se observar que os valores do parâmetro característico não evoluem de forma linear com o aumento do caudal de água. Por exemplo quando o caudal de ar é de 0,059 [kg/s] o parâmetro característico aumenta conforme o caudal de água aumenta, no entanto quando o caudal

de água toma o valor de 0,139 [kg/s] o valor do parâmetro característico sofre uma ligeira descida. Esta irregularidade no desenvolvimento do parâmetro é observada para os restantes casos.

O cálculo da previsão das condições de saída da torre de arrefecimento foi feito através de um processo iterativo, em que as condições de saída da torre na 1ª iteração são arbitradas.

A fim de averiguar a precisão das correlações obtidas para o cálculo do parâmetro característico fora das condições simuladas experimentalmente e dos valores de temperaturas determinados a partir desse parâmetro característico ter-se-ia de realizar novos ensaios com as condições utilizadas.

6. – Referências Bibliográficas

- ❖ Cengel, Y. A. e Boles, M. A, *Thermodynamics - 5th Edition*, McGraw Hill, 2006.
- ❖ Incropera, F. P. e DeWitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley and Sons, 2001
- ❖ Stoecker, Wibert F. e Jones, J. W. *Refrigeração e Ar Condicionado*; tradução Jabardo, José M. S., McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1985

7. – Anexos

Anexo I: Medições obtidas – Temperatura do caudal de água

❖ Ensaio 1

Tabela 43 - Ensaio 1 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	27,9	27,9	25,7	22,2	22,2
10	27,9	27,9	25,7	22,1	22,1
20	27,9	27,9	25,8	22,1	22,1
30	28,0	27,9	25,8	22,1	22,1
40	28,0	28,0	25,8	22,1	22,1
50	28,0	28,0	25,8	22,1	22,0
60	28,0	28,0	25,8	22,1	22,1
70	28,0	28,0	25,8	22,2	22,1
80	28,0	28,0	25,8	22,1	22,1
90	28,0	28,0	25,8	22,2	22,1
100	28,0	28,0	25,8	22,1	22,1
110	28,0	28,0	25,8	22,1	22,1
120	28,0	28,0	25,9	22,1	22,1
130	28,1	28,0	25,8	22,1	22,1
140	28,1	28,0	25,9	22,1	22,1
150	28,1	28,0	25,9	22,1	22,1
160	28,1	28,0	25,9	22,1	22,1
170	28,1	28,0	25,9	22,1	22,1
180	28,1	28,0	25,9	22,1	22,1
190	28,1	28,0	25,9	22,1	22,1
200	28,1	28,0	25,9	22,1	22,0
Média	28,0	28,0	25,8	22,1	22,1
Desvio Padrão	0,038	0,036	0,030	0,023	0,037

❖ Ensaio 2

Tabela 44 - Ensaio 2 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	28,32	28,27	25,72	21,6	21,5
10	28,29	28,24	25,7	21,6	21,58
20	28,29	28,27	25,62	21,6	21,5

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
30	28,4	28,3	25,7	21,7	21,6
40	28,4	28,4	25,7	21,6	21,5
50	28,4	28,4	25,7	21,6	21,6
60	28,5	28,4	25,6	21,6	21,5
70	28,5	28,4	25,7	21,6	21,5
80	28,5	28,5	25,7	21,6	21,6
90	28,6	28,5	25,7	21,6	21,5
100	28,6	28,5	25,8	21,6	21,5
110	28,6	28,5	25,8	21,6	21,5
120	28,6	28,5	25,8	21,6	21,5
130	28,6	28,6	25,7	21,6	21,5
140	28,7	28,7	25,7	21,5	21,4
150	28,8	28,7	25,7	21,5	21,4
160	28,8	28,8	25,7	21,5	21,5
170	28,7	28,7	25,8	21,6	21,6
180	28,7	28,6	25,9	21,6	21,5
190	28,6	28,6	25,9	21,6	21,5
200	28,6	28,5	25,9	21,6	21,6
Média	28,5	28,5	25,7	21,6	21,5
Desvio Padrão	0,127	0,124	0,076	0,050	0,052

❖ Ensaio 3

Tabela 45 - Ensaio 3 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	29,4	29,3	26,0	21,5	21,4
10	29,4	29,3	26,0	21,5	21,4
20	29,4	29,3	26,1	21,5	21,5
30	29,3	29,3	25,9	21,5	21,4
40	29,2	29,2	26,0	21,5	21,4
50	29,2	29,1	26,0	21,5	21,4
60	29,1	29,1	26,0	21,5	21,3
70	29,1	29,1	26,0	21,5	21,5
80	29,1	29,0	26,0	21,5	21,4
90	29,1	29,0	25,9	21,5	21,4
100	29,1	29,0	25,9	21,5	21,4
110	29,1	29,1	25,9	21,4	21,4
120	29,1	29,0	25,8	21,5	21,4
130	29,1	29,1	25,9	21,4	21,5

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
140	29,1	29,0	25,9	21,5	21,3
150	29,0	29,0	25,9	21,5	21,5
160	29,0	29,0	25,9	21,5	21,4
170	29,0	29,0	25,9	21,5	21,4
180	29,0	29,0	25,9	21,5	21,4
190	29,0	28,9	25,8	21,5	21,4
200	29,0	28,9	25,8	21,5	21,4
Média	29,1	29,1	25,9	21,5	21,5
Desvio Padrão	0,124	0,126	0,080	0,028	0,053

❖ Ensaio 4

Tabela 46 - Ensaio 4 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	29,3	29,2	25,9	21,4	21,3
10	29,2	29,2	25,9	21,4	21,3
20	29,2	29,2	25,8	21,4	21,2
30	29,2	29,1	25,8	21,4	21,3
40	29,2	29,1	25,8	21,4	21,3
50	29,2	29,2	25,8	21,4	21,3
60	29,2	29,2	25,7	21,4	21,2
70	29,3	29,2	25,7	21,3	21,2
80	29,3	29,2	25,7	21,4	21,3
90	29,3	29,3	25,7	21,3	21,2
100	29,4	29,3	25,8	21,3	21,2
110	29,4	29,3	25,7	21,3	21,3
120	29,4	29,3	25,8	21,3	21,3
130	29,5	29,4	25,8	21,4	21,2
140	29,5	29,4	25,7	21,3	21,2
150	29,5	29,4	25,8	21,3	21,3
160	29,5	29,4	25,8	21,3	21,2
170	29,5	29,5	25,8	21,3	21,2
180	29,6	29,5	25,9	21,3	21,3
190	29,6	29,5	25,8	21,3	21,2
200	29,5	29,5	25,8	21,2	21,2
Média	29,3	29,3	25,8	21,3	21,3
Desvio Padrão	0,135	0,130	0,060	0,044	0,034

❖ Ensaio 5

Tabela 47 - Ensaio 5 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	33,8	33,7	32,8	27,8	27,9
10	33,8	33,7	32,8	27,9	27,8
20	33,8	33,8	32,8	28,0	27,6
30	33,8	33,8	32,8	28,0	27,3
40	33,8	33,8	32,8	27,9	28,1
50	33,8	33,8	32,8	28,0	28,0
60	33,8	33,8	32,8	27,9	27,7
70	33,8	33,8	32,8	27,9	27,5
80	33,8	33,8	32,8	27,9	28,2
90	33,8	33,8	32,8	28,1	28,3
100	33,8	33,8	32,8	27,9	28,3
110	33,8	33,8	32,9	27,9	27,9
120	33,8	33,8	32,9	28,0	28,2
130	33,8	33,8	32,9	28,0	27,8
140	33,8	33,8	32,9	28,0	27,4
150	33,8	33,8	32,9	27,9	27,8
160	33,9	33,8	32,9	28,0	27,7
170	33,8	33,8	32,9	27,9	28,3
180	33,9	33,8	32,9	27,9	28,2
190	33,9	33,8	32,9	28,0	27,8
200	33,9	33,8	32,9	27,9	28,2
Média	33,8	33,8	32,9	27,9	27,9
Desvio Padrão	0,034	0,033	0,036	0,060	0,310

❖ Ensaio 6

Tabela 48 - Ensaio 6 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	34,1	34,0	32,8	27,2	27,1
10	34,1	34,1	32,8	27,4	27,7
20	34,1	34,0	32,9	27,3	26,9
30	34,1	34,0	32,8	27,4	27,0
40	34,1	34,0	32,9	27,3	27,2
50	34,1	34,0	32,9	27,4	27,4
60	34,1	34,0	32,9	27,4	27,7

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
70	34,1	34,0	32,8	27,3	27,3
80	34,1	34,0	32,8	27,4	27,1
90	34,1	34,0	32,8	27,4	28,0
100	34,1	34,0	32,8	27,2	27,9
110	34,1	34,0	32,8	27,5	27,2
120	34,1	34,0	32,9	27,5	27,0
130	34,1	34,0	32,9	27,3	27,7
140	34,1	34,0	32,8	27,3	27,2
150	34,1	34,0	32,9	27,3	26,8
160	34,1	34,0	32,9	27,3	27,0
170	34,1	34,0	32,8	27,3	27,6
180	34,1	34,0	32,8	27,4	27,4
190	34,1	34,1	32,8	27,2	27,6
200	34,1	34,1	32,8	27,3	26,7
Média	34,1	34,0	32,8	27,3	27,3
Desvio Padrão	0,015	0,020	0,042	0,081	0,364

❖ Ensaio 7

Tabela 49 - Ensaio 7 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	34,4	34,4	32,9	27,1	26,2
10	34,4	34,4	32,9	27,0	26,9
20	34,4	34,4	32,9	27,0	27,2
30	34,4	34,4	32,9	27,2	27,6
40	34,4	34,4	32,9	27,1	26,8
50	34,5	34,4	32,9	26,8	27,5
60	34,5	34,4	32,9	26,9	27,0
70	34,5	34,4	32,9	27,2	27,1
80	34,5	34,4	32,9	26,9	26,7
90	34,5	34,4	32,9	27,0	26,4
100	34,5	34,4	32,9	26,9	26,7
110	34,5	34,4	32,9	27,0	26,6
120	34,5	34,5	32,9	26,9	26,7
130	34,5	34,5	32,9	26,9	27,4
140	34,5	34,5	33,0	27,1	27,5
150	34,5	34,4	33,0	27,0	27,4
160	34,5	34,4	33,0	27,0	27,8
170	34,4	34,4	33,0	27,1	26,7

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
180	34,4	34,3	33,0	27,0	26,9
190	34,4	34,3	32,9	27,1	27,4
200	34,3	34,3	32,9	26,9	27,0
Média	34,4	34,4	32,9	27,0	27,0
Desvio Padrão	0,054	0,047	0,046	0,106	0,417

❖ Ensaio 8

Tabela 50 - Ensaio 8 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	34,1	34,0	32,3	26,2	25,5
10	34,1	34,0	32,2	26,2	26,8
20	34,1	34,0	32,3	26,2	26,2
30	34,1	34,0	32,2	26,0	25,7
40	34,1	34,0	32,2	26,2	26,7
50	34,1	34,0	32,2	26,2	26,1
60	34,1	34,0	32,2	26,0	26,0
70	34,1	34,0	32,1	26,2	26,2
80	34,1	34,0	32,2	26,0	26,8
90	34,1	34,1	32,2	26,1	26,2
100	34,1	34,1	32,2	26,1	26,5
110	34,1	34,1	32,3	26,1	25,9
120	34,1	34,1	32,2	25,9	26,2
130	34,1	34,1	32,2	26,1	26,2
140	34,2	34,1	32,2	26,1	26,2
150	34,2	34,1	32,2	26,0	26,5
160	34,2	34,1	32,2	26,1	26,4
170	34,2	34,1	32,3	26,3	26,7
180	34,2	34,1	32,3	26,1	26,5
190	34,2	34,1	32,3	26,0	26,9
200	34,2	34,1	32,2	25,9	26,7
Média	34,1	34,1	32,2	26,1	26,3
Desvio Padrão	0,036	0,038	0,040	0,109	0,367

❖ Ensaio 9

Tabela 51 - Ensaio 9 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	31,1	31,0	29,7	25,1	25,1
10	31,1	31,0	29,7	25,2	25,1
20	31,1	31,0	29,7	25,1	24,8
30	31,1	31,0	29,7	25,1	25,0
40	31,1	31,0	29,5	25,0	25,0
50	31,1	31,0	29,6	24,8	24,8
60	31,2	31,1	29,6	25,0	24,9
70	31,1	31,1	29,6	25,1	25,1
80	31,1	31,1	29,7	25,2	25,1
90	31,1	31,0	29,8	25,2	25,1
100	31,0	31,0	29,7	25,1	25,1
110	31,0	31,0	29,6	25,2	25,3
120	31,0	31,0	29,6	25,2	25,2
130	31,0	31,0	29,6	25,1	24,9
140	31,0	31,0	29,6	25,1	25,4
150	31,0	31,0	29,6	25,0	25,0
160	31,0	31,0	29,5	25,0	25,1
170	31,1	31,0	29,6	25,0	25,1
180	31,1	31,0	29,6	25,0	25,1
190	31,1	31,1	29,7	25,2	25,4
200	31,1	31,1	29,7	25,2	25,4
Média	31,0	31,0	29,6	25,1	25,1
Desvio Padrão	0,046	0,043	0,064	0,096	0,177

❖ Ensaio 10

Tabela 52 - Ensaio 10 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	30,4	30,4	28,6	24,2	24,4
10	30,4	30,4	28,7	24,3	24,5
20	30,4	30,4	28,7	24,0	23,6
30	30,4	30,4	28,6	24,3	24,2
40	30,4	30,4	28,6	24,1	24,0
50	30,4	30,4	28,7	24,1	24,1

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
60	30,5	30,4	28,7	24,0	23,9
70	30,5	30,4	28,7	23,9	24,4
80	30,5	30,4	28,7	24,1	24,0
90	30,5	30,5	28,7	24,2	24,5
100	30,5	30,5	28,6	24,1	24,4
110	30,5	30,5	28,7	24,2	24,1
120	30,6	30,5	28,7	24,2	24,2
130	30,6	30,5	28,8	24,3	24,0
140	30,6	30,6	28,8	24,0	23,8
150	30,6	30,6	28,8	24,1	24,0
160	30,6	30,6	28,8	24,2	24,7
170	30,7	30,6	28,8	24,1	24,2
180	30,7	30,6	28,8	24,1	24,2
190	30,7	30,6	28,9	24,3	24,0
200	30,7	30,7	28,8	24,3	24,1
Média	30,5	30,5	28,7	24,2	24,2
Desvio Padrão	0,091	0,095	0,075	0,111	0,258

❖ Ensaio 11

Tabela 53 -Ensaio 11 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	31,2	31,2	29,1	24,1	24,2
10	31,2	31,2	29,1	23,9	23,8
20	31,2	31,2	29,0	23,9	23,9
30	31,2	31,2	29,0	24,3	24,2
40	31,2	31,1	29,1	24,1	24,0
50	31,2	31,1	29,0	24,0	24,0
60	31,2	31,1	29,1	24,2	24,0
70	31,2	31,1	29,1	24,3	24,6
80	31,2	31,2	29,0	24,2	24,1
90	31,2	31,1	29,1	24,0	24,2
100	31,2	31,2	29,1	24,0	24,5
110	31,2	31,2	29,0	23,9	23,8
120	31,3	31,2	29,0	24,1	24,3
130	31,3	31,2	29,1	24,2	24,6
140	31,3	31,3	28,9	24,1	23,9
150	31,3	31,3	29,1	23,9	24,0
160	31,3	31,3	29,1	24,2	24,6

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
170	31,3	31,3	29,1	24,0	24,5
180	31,3	31,3	29,1	23,9	23,7
190	31,3	31,3	29,1	24,0	24,4
200	31,3	31,3	29,1	24,0	24,4
Média	31,2	31,2	29,0	24,1	24,2
Desvio Padrão	0,061	0,064	0,057	0,134	0,283

❖ Ensaio 12

Tabela 54 - Ensaio 12 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de água

t [s]	T_{A1} [°C]	T_{A2} [°C]	T_{A3} [°C]	T_{A4} [°C]	T_{A5} [°C]
0	31,8	31,7	29,0	23,9	24,5
10	31,8	31,7	29,1	23,7	24,0
20	31,8	31,7	29,1	23,8	23,8
30	31,8	31,7	29,0	23,9	23,9
40	31,8	31,7	29,0	23,9	23,9
50	31,8	31,7	29,0	23,8	23,3
60	31,8	31,7	28,9	23,9	23,6
70	31,8	31,7	29,1	23,8	23,4
80	31,8	31,7	29,1	23,9	23,6
90	31,7	31,7	29,1	24,0	23,6
100	31,7	31,6	29,1	23,9	23,5
110	31,6	31,6	29,0	23,9	23,3
120	31,6	31,6	29,0	24,0	24,2
130	31,5	31,5	29,0	24,0	23,4
140	31,6	31,5	28,9	23,9	23,9
150	31,6	31,5	28,9	23,8	23,3
160	31,6	31,5	28,9	24,0	24,2
170	31,6	31,5	28,9	23,9	23,8
180	31,6	31,5	28,9	24,1	24,0
190	31,6	31,5	28,9	23,8	23,8
200	31,6	31,5	28,9	23,8	23,2
Média	31,6	31,6	29,0	23,9	23,7
Desvio Padrão	0,100	0,099	0,070	0,081	0,360

Anexo II: Medições obtidas – Temperatura do caudal de ar

❖ Ensaio 1

Tabela 55 - Ensaio 1 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	18,6	14,7	18,6	25,7	25,6
10	18,5	14,8	18,5	25,7	25,5
20	18,5	14,9	18,5	25,7	25,5
30	18,5	14,9	18,5	25,7	25,5
40	18,5	14,9	18,5	25,7	25,6
50	18,5	14,9	18,5	25,7	25,6
60	18,5	14,9	18,5	25,7	25,6
70	18,5	14,9	18,5	25,7	25,6
80	18,3	14,9	18,3	25,7	25,6
90	18,3	14,8	18,3	25,7	25,6
100	18,5	14,8	18,5	25,7	25,6
110	18,3	14,8	18,3	25,7	25,6
120	18,3	14,8	18,3	25,7	25,6
130	18,3	14,7	18,3	25,7	25,6
140	18,3	14,8	18,3	25,7	25,6
150	18,3	14,8	18,3	25,8	25,6
160	18,4	14,8	18,4	25,8	25,6
170	18,4	14,7	18,4	25,8	25,6
180	18,5	14,7	18,5	25,8	25,6
190	18,6	14,9	18,6	25,8	25,6
200	18,5	14,8	18,5	25,8	25,6
Média	18,4	14,8	18,4	25,7	25,6
Desvio Padrão	0,099	0,070	0,099	0,034	0,032

❖ Ensaio 2

Tabela 56 - Ensaio 2 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	18,9	14,9	18,9	25,7	25,5
10	19,1	15,0	19,1	25,7	25,5
20	19,1	15,0	19,1	25,7	25,5
30	19,0	15,0	19,0	25,7	25,6

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
40	18,9	14,9	18,9	25,7	25,6
50	18,9	14,7	18,9	25,7	25,6
60	18,9	14,9	18,9	25,7	25,6
70	18,8	14,8	18,8	25,8	25,6
80	18,8	14,9	18,8	25,8	25,6
90	19,1	14,9	19,1	25,8	25,6
100	19,0	14,9	19,0	25,8	25,6
110	19,0	14,9	19,0	25,8	25,7
120	18,9	14,9	18,9	25,8	25,6
130	18,8	14,9	18,8	25,8	25,6
140	19,1	14,9	19,1	25,8	25,7
150	18,9	14,9	18,9	25,8	25,7
160	18,8	14,9	18,8	25,9	25,8
170	18,9	14,9	18,9	25,9	25,8
180	18,9	14,8	18,9	25,9	25,8
190	18,9	14,8	18,9	25,9	25,7
200	18,9	14,8	18,9	25,9	25,7
Média	18,9	14,9	18,9	25,8	25,6
Desvio Padrão	0,095	0,066	0,095	0,076	0,085

❖ Ensaio 3

Tabela 57 - Ensaio 3 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,2	15,0	19,2	26,3	26,1
10	19,1	15,1	19,1	26,3	26,1
20	19,1	14,9	19,1	26,3	26,1
30	19,0	14,9	19,0	26,3	26,1
40	18,8	14,9	18,8	26,3	26,0
50	19,0	14,9	19,0	26,2	26,0
60	19,1	14,9	19,1	26,2	26,0
70	18,7	14,9	18,7	26,2	26,0
80	19,1	14,9	19,1	26,2	26,0
90	19,0	15,1	19,0	26,1	25,9
100	19,0	15,0	19,0	26,1	25,9
110	19,1	15,0	19,1	26,1	25,9

120	19,1	14,9	19,1	26,1	25,9
130	19,1	15,0	19,1	26,1	25,9
140	19,1	15,0	19,1	26,1	25,9
150	19,1	15,1	19,1	26,1	25,9
160	19,0	15,0	19,0	26,1	25,9
170	19,1	14,9	19,1	26,1	25,9
180	19,0	15,0	19,0	26,1	25,9
190	19,0	15,0	19,0	26,1	25,9
200	19,0	14,9	19,0	26,1	25,9
Média	19,0	15,0	19,0	26,2	26,0
Desvio Padrão	0,109	0,070	0,109	0,088	0,089

❖ Ensaio 4

Tabela 58 - Ensaio 4 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,2	15,3	19,2	26,0	25,9
10	19,4	15,3	19,4	26,0	25,9
20	19,4	15,4	19,4	26,0	25,9
30	19,2	15,5	19,2	26,0	25,9
40	19,2	15,5	19,2	26,0	25,8
50	19,4	15,4	19,4	26,0	25,8
60	19,2	15,3	19,2	26,0	25,8
70	19,4	15,3	19,4	26,0	25,8
80	19,2	15,3	19,2	26,0	25,9
90	19,3	15,3	19,3	26,0	25,9
100	19,3	15,4	19,3	26,0	25,9
110	19,5	15,4	19,5	26,0	25,9
120	19,4	15,4	19,4	26,0	25,9
130	19,5	15,4	19,5	26,0	25,9
140	19,5	15,4	19,5	26,0	25,9
150	19,3	15,4	19,3	26,1	25,9
160	19,4	15,3	19,4	26,1	25,9
170	19,3	15,3	19,3	26,1	26,0
180	19,4	15,4	19,4	26,1	26,0
190	19,4	15,3	19,4	26,1	26,0
200	19,4	15,3	19,4	26,1	26,0
Média	19,3	15,4	19,3	26,0	25,9

Desvio Padrão	0,092	0,064	0,092	0,060	0,057
---------------	-------	-------	-------	-------	-------

❖ Ensaio 5

Tabela 59 - Ensaio 5 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
10	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
20	19,2	15,3	19,2	32,0	31,9
30	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
40	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
50	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
60	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
70	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
80	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
90	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
100	19,2	15,3	19,2	31,9	31,9
110	19,2	15,3	19,2	32,0	32,0
120	19,2	15,3	19,2	32,0	31,9
130	19,2	15,3	19,2	32,0	32,0
140	19,2	15,3	19,2	32,0	32,0
150	19,2	15,3	19,2	32,0	32,0
160	19,2	15,3	19,2	32,0	31,9
170	19,2	15,3	19,2	32,0	31,9
180	19,2	15,3	19,2	32,0	32,0
190	19,2	15,3	19,2	32,0	32,0
200	19,2	15,3	19,2	32,0	32,0
Média	19,2	15,3	19,2	32,0	31,9
Desvio Padrão	0,0	0,00	0,00	0,035	0,038

❖ Ensaio 6

Tabela 60 - Ensaio 6 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,3	15,3	19,3	32,1	31,9
10	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
20	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
30	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
40	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
50	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
60	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
70	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
80	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
90	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
100	19,3	15,3	19,3	32,1	31,9
110	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
120	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
130	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
140	19,3	15,3	19,3	32,1	31,9
150	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
160	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
170	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
180	19,3	15,3	19,3	32,0	31,9
190	19,3	15,3	19,3	32,0	31,9
200	19,3	15,3	19,3	32,1	31,9
Media	19,3	15,3	19,3	32,1	32,0
Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,025	0,021

❖ Ensaio 7

Tabela 61 - Ensaio 7 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
10	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
20	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
30	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
40	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
50	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
60	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
70	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
80	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
90	19,5	15,3	19,5	32,2	32,2
100	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
110	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
120	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
130	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
140	19,5	15,3	19,5	32,3	32,1
150	19,5	15,3	19,5	32,3	32,2
160	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
170	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
180	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
190	19,5	15,3	19,5	32,2	32,2
200	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
Média	19,5	15,3	19,5	32,2	32,1
Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,029	0,027

❖ Ensaio 8

Tabela 62 - Ensaio 8 -Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
10	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
20	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
30	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
40	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
50	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
60	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
70	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
80	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
90	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
100	18,8	14,2	18,8	31,8	31,5
110	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
120	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
130	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
140	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
150	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
160	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
170	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
180	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
190	18,8	14,2	18,8	31,9	31,6
200	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
Média	18,8	14,2	18,8	31,8	31,6
Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,026	0,031

❖ Ensaio 9

Tabela 63 - Ensaio 9 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,5	15,4	19,5	29,1	29,1
10	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
20	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
30	19,5	15,4	19,5	29,1	29,1
40	19,5	15,4	19,5	29,1	29,1
50	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
60	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
70	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
80	19,5	15,4	19,5	29,2	29,2
90	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
100	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
110	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
120	19,5	15,4	19,5	29,1	29,1
130	19,5	15,4	19,5	29,1	29,1
140	19,5	15,4	19,5	29,1	29,1
150	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
160	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
170	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
180	19,5	15,4	19,5	29,2	29,2
190	19,5	15,4	19,5	29,2	29,2
200	19,5	15,4	19,5	29,2	29,2
Média	19,5	15,4	19,5	29,2	29,1
Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,029	0,035

❖ Ensaio 10

Tabela 64 - Ensaio 10 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,6	15,5	19,6	28,4	28,4
10	19,6	15,5	19,6	28,4	28,3
20	19,6	15,5	19,6	28,4	28,4
30	19,6	15,5	19,6	28,4	28,4
40	19,6	15,5	19,6	28,4	28,4
50	19,6	15,5	19,6	28,4	28,4
60	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
70	19,6	15,5	19,6	28,4	28,4
80	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
90	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
100	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
110	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
120	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
130	19,6	15,5	19,6	28,5	28,5
140	19,6	15,5	19,6	28,5	28,5
150	19,6	15,5	19,6	28,5	28,5
160	19,6	15,5	19,6	28,5	28,5
170	19,6	15,5	19,6	28,6	28,5
180	19,6	15,5	19,6	28,6	28,5
190	19,6	15,5	19,6	28,6	28,5
200	19,6	15,5	19,6	28,6	28,6
Média	19,6	15,5	19,6	28,5	28,4
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,075	0,070

❖ Ensaio 11

Tabela 65 - Ensaio 11 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,5	15,5	19,5	28,9	28,9
10	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
20	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
30	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
40	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
50	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
60	19,5	15,5	19,5	28,8	28,8
70	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
80	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
90	19,5	15,5	19,5	28,8	28,8
100	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
110	19,5	15,5	19,5	28,8	28,8
120	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
130	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
140	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
150	19,5	15,5	19,5	28,9	28,9
160	19,5	15,5	19,5	28,9	28,9
170	19,5	15,5	19,5	28,9	28,9
180	19,5	15,5	19,5	28,9	28,9
190	19,5	15,5	19,5	28,9	28,9
200	19,5	15,5	19,5	29,0	28,9
Media	19,5	15,5	19,5	28,9	28,8
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,038	0,037

❖ Ensaio 12

Tabela 66 - Ensaio 12 - Leituras obtidas da temperatura do caudal de ar

t [s]	T_{B1} [°C]	T_{B2} [°C]	T_{B3} [°C]	T_{B4} [°C]	T_{B5} [°C]
0	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
10	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
20	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
30	19,6	15,4	19,6	29,1	29,1
40	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
50	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
60	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
70	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
80	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
90	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
100	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
110	19,6	15,4	19,6	29,0	29,0
120	19,6	15,4	19,6	29,0	29,0
130	19,6	15,4	19,6	29,0	28,9
140	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
150	19,6	15,4	19,6	29,0	28,9
160	19,6	15,4	19,6	29,0	28,9
170	19,6	15,4	19,6	29,0	28,9

180	19,6	15,4	19,6	29,0	28,9
190	19,6	15,4	19,6	29,0	28,9
200	19,6	15,4	19,6	29,0	28,9
Média	19,6	15,4	19,6	29,1	29,0
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,058	0,047

Anexo III: Cálculos – Caudal de ar

\dot{m}_g [kg/s]						
t [s]	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
0	0,101	0,105	0,106	0,103	0,059	0,059
10	0,104	0,104	0,107	0,102	0,059	0,056
20	0,104	0,105	0,105	0,103	0,059	0,059
30	0,104	0,105	0,104	0,104	0,061	0,058
40	0,104	0,105	0,104	0,104	0,058	0,058
50	0,106	0,104	0,104	0,104	0,058	0,056
60	0,106	0,106	0,105	0,104	0,060	0,055
70	0,105	0,106	0,103	0,104	0,060	0,057
80	0,105	0,106	0,104	0,104	0,057	0,058
90	0,104	0,107	0,105	0,104	0,056	0,054
100	0,104	0,107	0,105	0,105	0,056	0,055
110	0,104	0,107	0,106	0,106	0,059	0,057
120	0,105	0,108	0,105	0,106	0,057	0,058
130	0,105	0,108	0,105	0,106	0,059	0,056
140	0,105	0,110	0,105	0,106	0,061	0,058
150	0,105	0,111	0,104	0,107	0,059	0,060
160	0,105	0,110	0,104	0,106	0,060	0,059
170	0,104	0,108	0,103	0,106	0,057	0,056
180	0,104	0,107	0,104	0,107	0,058	0,057
190	0,106	0,106	0,104	0,106	0,059	0,057
200	0,107	0,105	0,104	0,107	0,058	0,061

\dot{m}_g [kg/s]						
t [s]	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12
0	0,060	0,058	0,076	0,073	0,074	0,072
10	0,058	0,053	0,075	0,072	0,077	0,074
20	0,057	0,055	0,078	0,079	0,077	0,075
30	0,055	0,058	0,076	0,074	0,073	0,074

\dot{m}_g [kg/s]						
t [s]	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12
40	0,058	0,054	0,077	0,076	0,075	0,074
50	0,056	0,056	0,080	0,075	0,076	0,077
60	0,058	0,057	0,078	0,077	0,074	0,075
70	0,056	0,056	0,077	0,075	0,071	0,076
80	0,059	0,054	0,076	0,076	0,074	0,075
90	0,060	0,056	0,075	0,073	0,074	0,075
100	0,059	0,055	0,075	0,075	0,073	0,075
110	0,060	0,057	0,073	0,075	0,077	0,076
120	0,059	0,057	0,074	0,075	0,074	0,071
130	0,057	0,056	0,077	0,076	0,072	0,075
140	0,056	0,056	0,073	0,078	0,077	0,073
150	0,056	0,055	0,076	0,078	0,077	0,076
160	0,055	0,055	0,076	0,073	0,072	0,071
170	0,058	0,054	0,076	0,076	0,074	0,073
180	0,057	0,055	0,076	0,076	0,079	0,071
190	0,055	0,054	0,074	0,076	0,075	0,074
200	0,057	0,055	0,074	0,075	0,074	0,077

Anexo IV: Cálculos – Pressão da água saturada

Tabela 67 - Pressão água Saturada

T_g [°C]	P [kPa]
0	0,611
1	0,657
2	0,706
3	0,758
4	0,814
5	0,873
6	0,935
7	1,00
8	1,07
9	1,15
10	1,23
11	1,31
12	1,40
13	1,50

T_g [°C]	P [kPa]
14	1,60
15	1,71
16	1,82
17	1,94
18	2,06
19	2,20
20	2,34
21	2,49
22	2,64
23	2,81
24	2,99
25	3,17
26	3,36
27	3,57
28	3,78
29	4,01
30	4,25
31	4,50
32	4,76
33	5,03
34	5,32
35	5,63

Anexo IV: Cálculos – Entalpia do ar húmido saturado

Tabela 68 - Entalpia do ar húmido saturado

T_{gs} [°C]	h_{gs} [kJ/kg]
0,00	9,47
1,00	11,20
2,00	12,98
3,00	14,81
4,00	16,70
5,00	18,64
6,00	20,64
7,00	22,71
8,00	24,85
9,00	27,06
10,00	29,35

T_{gs} [°C]	h_{gs} [kJ/kg]
11,00	31,72
12,00	34,18
13,00	36,73
14,00	39,37
15,00	42,11
16,00	44,96
17,00	47,93
18,00	51,01
19,00	54,22
20,00	57,56
21,00	61,04
22,00	64,66
23,00	68,44
24,00	72,39
25,00	76,50
26,00	80,80
27,00	85,29
28,00	89,98
29,00	94,88
30,00	100,01
31,00	105,37
32,00	110,98
33,00	116,86
34,00	123,01
35,00	129,46
36,00	136,21
37,00	143,29
38,00	150,71
39,00	158,50
40,00	166,68
41,00	175,27
42,00	184,28
43,00	193,75
44,00	203,70
45,00	214,16

