

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO  
AUTOMÁTICA DE MEDIDA DE TEMPERATURA  
E SUA UTILIZAÇÃO EM UM MODELO REDUZIDO  
DE LAGOA DE RESFRIAMENTO**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017900

**CELSO LUIZ FRANZOTTI**



Tese apresentada ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, como parte dos requisitos, para obtenção do Título de Doutor em Hidráulica e Saneamento.

**Orientador: Prof. Titular Woodrow Nelson Lopes Roma**

**São Carlos - Fevereiro - 1998**

|        |             |
|--------|-------------|
| Class. | TESE - EESC |
| Cuti.  | F2332       |
| Tombo  | T0114/98    |

31100017900

Hidráulica e Saneamento  
st 0964701

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

F837d Franzotti, Celso Luiz  
Desenvolvimento de instrumentação automática de  
medida de temperatura e sua utilização em modelo  
reduzido de lagoa de resfriamento / Celso Luiz  
Franzotti. -- São Carlos, 1998.


Tese (Doutorado). -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.  
Área: Hidráulica e Saneamento.  
Orientador: Prof. Dr. Woodrow Nelson Lopes  
Roma

1. Lagoa de resfriamento. 2. Instrumentação  
ambiental. 3. Automatização de medidas. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Bacharel **CELSO LUIZ FANZOTTI**

Tese defendida e aprovada em 09-02-1998.  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Titular **WOODROW NELSON LOPES ROMA (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



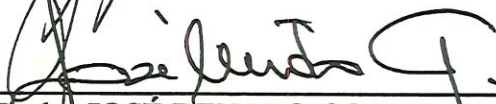
---

Prof. Titular **MARCIUS FANTOZZI GIORGETTI (Aposentado)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Titular **HANS GEORGE ARENS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



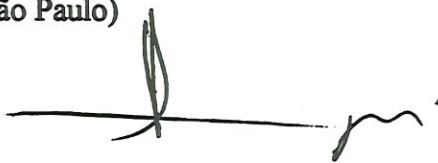
---

Prof. Titular **JOSÉ RENATO COURY**  
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



---

Prof. Doutor **JAIME PINTO ORTIZ**  
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Titular. **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**  
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



---

**JOSE CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

**A Luciana pelo apoio, compreensão,  
ajuda e principalmente pelo amor  
dedicado durante todo o tempo**

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Woodrow pela orientação e pelos conhecimentos que recebi durante todo o trabalho, sem os quais não teria chegado a este ponto na vida.

Ao Wagner, amigo e fiel escudeiro nas montagens de toda parte eletrônica deste trabalho.

Ao Barbosa, Laíze, Xuxu, Bérghamo, Luis, colegas de anos de convívio no LFT.

Em especial ao Professor Dr. Marcius Giorgetti, pelas idéias e sugestões que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha família que sempre me apoiou em todos os sentidos.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

A todos que direta ou indiretamente me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

|  |              |
|--|--------------|
| <b>LISTA DE TABELAS</b>                                    | <b>vii</b>   |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>                                    | <b>viii</b>  |
| <b>GLOSSÁRIO DE ABREVIACÕES E SIMBOLOS</b>                 | <b>xiv</b>   |
| <b>RESUMO</b>  | <b>xvii</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>  | <b>xviii</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                       | <b>1</b>     |
| <b>2. OBJETIVOS</b>  | <b>5</b>     |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                            | <b>6</b>     |
| <b>3.1. Balanço de Calor num Corpo D'Água</b>              | <b>6</b>     |
| <b>3.1.1. Evaporação</b>                                   | <b>7</b>     |
| <b>3.1.2. Condução</b>                                     | <b>10</b>    |
| <b>3.1.3. Radiação</b>                                     | <b>11</b>    |
| <b>3.1.3.1. Radiação Solar</b>                             | <b>11</b>    |
| <b>3.1.3.2. Radiação Solar Refletida</b>                   | <b>12</b>    |
| <b>3.1.3.3. Radiação Atmosférica</b>                       | <b>13</b>    |
| <b>3.1.3.4. Reflexão da Radiação Atmosférica</b>           | <b>14</b>    |
| <b>3.1.3.5. Radiação de Ondas Longas da Água</b>           | <b>14</b>    |
| <b>3.1.4. Advecção nos Corpos D'Água</b>                   | <b>15</b>    |
| <b>3.1.5. Fluxo Líquido de Calor Linearizado</b>           | <b>17</b>    |
| <b>3.1.6. Fórmulas Utilizadas no Cálculo de K</b>          | <b>19</b>    |
| <b>3.2. Processos de Estratificação Térmica</b>            | <b>20</b>    |
| <b>3.2.1. Corpos D'Água Naturais</b>                       | <b>20</b>    |
| <b>3.2.2. Lagoas de Resfriamento</b>                       | <b>22</b>    |
| <b>3.3. Aspectos Teóricos das Lagoas de Resfriamento</b>   | <b>23</b>    |
| <b>3.3.1. Classificação das Lagoas de Resfriamento</b>     | <b>23</b>    |
| <b>3.3.2. Estrutura Térmica das Lagoas de Resfriamento</b> | <b>27</b>    |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.3. Correntes de Escoamento em Lagoas de Resfriamento                     | 29        |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>  | <b>30</b> |
| 4.1. Instrumentação Desenvolvida   | 31        |
| 4.2. Despejo Térmico   | 33        |
| 4.3. Estudo Térmico  | 34        |
| 4.3.1. Determinação do Regime Transiente e Permanente na Saída do Modelo     | 35        |
| 4.3.2. Tempo de Residência do Modelo   | 35        |
| 4.3.3. Dependência da Temperatura de Saída pela Vazão de Entrada             | 36        |
| 4.3.4. Dependência do Tempo de Residência pela Vazão de Entrada              | 36        |
| 4.3.5. Perfil de Temperatura ao Longo da Profundidade                        | 37        |
| 4.3.6. Temperatura da Água ao Longo do Escoamento Longitudinal               | 37        |
| 4.3.7. Isotermas de Temperatura  | 39        |
| 4.4. Estudo Dinâmico Através da Técnica de Visualização                      | 40        |
| 4.4.1. Campo de Escoamento Superficial                                       | 41        |
| 4.4.2. Campo de Escoamento Próximo ao Fundo do Modelo                        | 42        |
| 4.5. Análise da Perda de Calor Superficial                                   | 43        |
| 4.6. Cálculo do Adimensional de Pond para os Experimentos                    | 43        |
| <b>5. RESULTADOS</b>   |           |
| 5.1. Comportamento Transiente e Permanente da Temperatura na Saída do Modelo | 44        |
| 5.2. Tempo de Residência do Modelo   | 54        |
| 5.3. Dependência da Temperatura de Saída do Modelo pela Vazão de Entrada     | 63        |
| 5.4. Dependência do Tempo de Residência com a Vazão de Entrada               | 69        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>5.5. Determinação do Perfil de Temperaturas com a Profundidade do Modelo</b> | <b>73</b>  |
| <b>5.6. Temperatura da Água ao Longo do Escoamento</b>                          | <b>82</b>  |
| <b>5.7. Isotermas</b>   | <b>84</b>  |
| <b>5.8. Estudo do Escoamento Superficial e de Fundo no Modelo</b>               | <b>92</b>  |
| <b>5.8.1. Escoamento Superficial da Configuração Livre</b>                      | <b>92</b>  |
| <b>5.8.2. Escoamento Próximo ao Fundo da Configuração Livre</b>                 | <b>93</b>  |
| <b>5.8.3. Escoamento Superficial da Configuração S</b>                          | <b>94</b>  |
| <b>5.8.4. Escoamento Próximo ao Fundo da Configuração S</b>                     | <b>95</b>  |
| <b>6. CONCLUSÕES</b>  | <b>99</b>  |
| <b>7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS</b>                                     | <b>102</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>  | <b>103</b> |
| <b>ANEXO</b>  |            |



**LISTA DE TABELAS**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabela 1 - Tipo de configuração e vazões utilizadas</b>                         | <b>44</b> |
| <b>Tabela 2 - Vazão pelo tempo de residência para a configuração livre</b>         | <b>56</b> |
| <b>Tabela 3 - Vazão pelo tempo de residência para a configuração S</b>             | <b>59</b> |
| <b>Tabela 4 - Vazão pelo tempo de residência para a configuração U</b>             | <b>62</b> |
| <b>Tabela 5 - Vazão de entrada pela temperatura de saída na configuração livre</b> | <b>64</b> |
| <b>Tabela 6 - Vazão de entrada na configuração S pela temperatura de saída</b>     | <b>67</b> |
| <b>Tabela 7 - Vazão de entrada na configuração U pela temperatura de saída</b>     | <b>69</b> |
| <b>Tabela 8 - Quadro de cálculo das perdas de calor superficial</b>                | <b>96</b> |
| <b>Tabela 9 - Cálculo do número de pond do modelo</b>                              | <b>97</b> |

**LISTA DE FIGURAS**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 1 - Lago de Resfriamento (Ciclo Aberto)</b>                                 | <b>2</b>  |
| <b>Figura 2 - Lagoa de Resfriamento (Ciclo Fechado)</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>Figura 3 - Balanço total de calor num corpo d'água</b>                             | <b>6</b>  |
| <b>Figura 4 - Entrada tipo superficial</b>  | <b>15</b> |
| <b>Figura 5 - Entrada submersa</b>  | <b>16</b> |
| <b>Figura 6 - Entrada intermediária</b>   | <b>16</b> |
| <b>Figura 7 - Estrutura de estratificação de um corpo d'água</b>                      | <b>21</b> |
| <b>Figura 8 - Relação entre o gradiente normalizado e o número de pond</b>            | <b>25</b> |
| <b>Figura 9 - Estrutura Térmica de uma Lagoa Profunda</b>                             | <b>27</b> |
| <b>Figura 10 - Estrutura Térmica de uma Lagoa Rasa</b>                                | <b>28</b> |
| <b>Figura 11 - Configurações do escoamento</b>  | <b>30</b> |
| <b>Figura 12 - Curva de calibração dos termopares</b>                                 | <b>32</b> |
| <b>Figura 13 - Diagrama de blocos dos circuitos de controle e aquisição dos dados</b> | <b>33</b> |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 14</b> - Sistema de despejo térmico do modelo  | 34 |
| <b>Figura 15</b> - Pontos ao longo do escoamento na configuração U   | 38 |
| <b>Figura 16</b> - Pontos ao longo do escoamento na configuração S   | 39 |
| <b>Figura 17</b> - Pontos de medidas em uma dada profundidade e a interpolação correspondente das medidas realizadas | 40 |
| <b>Figura 18</b> - Ilustração do método usado para calcular o escoamento superficial                                 | 41 |
| <b>Figura 19</b> - Ilustração do método para medir o escoamento de fundo no modelo                                   | 42 |
| <b>Figura 20</b> - Temperatura de saída com configuração livre em condições de vazão baixa                           | 45 |
| <b>Figura 21</b> - Temperatura de saída com configuração livre em condições de vazão média                           | 46 |
| <b>Figura 22</b> - Temperatura de saída com configuração livre em condições de vazão alta                            | 47 |
| <b>Figura 23</b> - Temperatura de saída com configuração S em condições de vazão baixa                               | 48 |
| <b>Figura 24</b> - Temperatura de saída com configuração S em condições de vazão média                               | 49 |
| <b>Figura 25</b> - Temperatura de saída com configuração S em condições de vazão alta                                | 50 |
| <b>Figura 26</b> - Temperatura de saída com configuração U em condições de vazão baixa                               | 51 |

- Figura 27** - Temperatura de saída com configuração U em condições de vazão média 52
- Figura 28** - Temperatura de saída com configuração U em condições de vazão alta 53
- Figura 29** - Determinação do tempo de residência no escoamento livre em condições de vazão baixa 54
- Figura 30** - Determinação do tempo de residência no escoamento livre em condições de vazão média 55
- Figura 31** - Determinação do tempo de residência no escoamento livre em condições de vazão alta 56
- Figura 32** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão baixa 57
- Figura 33** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão média 58
- Figura 34** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão alta 59
- Figura 35** - Determinação do tempo de residência na configuração U em condições de vazão baixa 60
- Figura 36** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão média 61
- Figura 37** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão alta 62
- Figura 38** - Temperatura de saída para diferentes vazões de entrada em escoamento livre 63
- Figura 39** - Dependência da temperatura de saída pela vazão de entrada 65

- Figura 40** - Temperatura de saída para diferentes vazões de entrada na *Configuração S* 66
- Figura 41** - Dependência da temperatura de saída pela vazão de entrada da *Configuração S* 67
- Figura 42** - Temperatura de saída em diferentes vazões de entrada para a *Configuração U* 68
- Figura 43** - Dependência da temperatura de saída pela vazão de entrada 69
- Figura 44** - Dependência do tempo de residência pela vazão entrada no modelo para a *Configuração Livre* 70
- Figura 45** - Dependência do tempo de residência pela vazão entrada no modelo para a *Configuração S* 71
- Figura 46** - Dependência do tempo de residência pela vazão entrada no modelo para a *Configuração U* 72
- Figura 47** - Perfil de temperatura pela profundidade vazão baixa (*Configuração Livre*) 73
- Figura 48** - Perfil de temperatura pela profundidade vazão média (*Configuração Livre*) 74
- Figura 49** - Perfil de temperatura pela profundidade vazão alta (*Configuração Livre*) 75
- Figura 50** - Perfil de temperatura pela profundidade vazão baixa (*Configuração S*) 76
- Figura 51** - Perfil de temperatura pela profundidade vazão média (*Configuração S*) 77

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 52</b> - Perfil de temperatura pela profundidade vazão alta ( <i>Configuração S</i> )  | 78 |
| <b>Figura 53</b> - Perfil de temperatura pela profundidade vazão baixa ( <i>Configuração U</i> ) | 79 |
| <b>Figura 54</b> - Perfil de temperatura pela profundidade vazão média ( <i>Configuração U</i> ) | 80 |
| <b>Figura 55</b> - Perfil de temperatura pela profundidade vazão alta ( <i>Configuração U</i> )  | 81 |
| <b>Figura 56</b> - Temperatura ao longo do <i>Escoamento Tipo S</i>                              | 82 |
| <b>Figura 57</b> - Temperatura ao longo do <i>Escoamento Tipo U</i>                              | 83 |
| <b>Figura 58</b> - Isotermas para vazão baixa em 2 mm de profundidade                            | 84 |
| <b>Figura 59</b> - Isotermas para vazão baixa em 12 mm de profundidade                           | 85 |
| <b>Figura 60</b> - Isotermas para vazão baixa em 22 mm de profundidade                           | 85 |
| <b>Figura 61</b> - Isotermas para vazão média em 2 mm de profundidade                            | 86 |
| <b>Figura 62</b> - Isotermas para vazão média em 12 mm de profundidade                           | 86 |
| <b>Figura 63</b> - Isotermas para vazão média em 22 mm de profundidade                           | 87 |
| <b>Figura 64</b> - Isotermas para vazão alta em 2 mm de profundidade                             | 87 |
| <b>Figura 65</b> - Isotermas para vazão alta em 12 mm de profundidade                            | 88 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 66 - Isotermas para vazão alta em 22 mm de profundidade</b>    | <b>88</b> |
| <b>Figura 67 - Isotermas para o instante 10 segundos após a descarga</b> | <b>89</b> |
| <b>Figura 68 - Isotermas para 2 minutos após a descarga</b>              | <b>90</b> |
| <b>Figura 69 - Isotermas para 4 minutos após a descarga</b>              | <b>90</b> |
| <b>Figura 70 - Isotermas para 10 minutos após a descarga</b>             | <b>91</b> |
| <b>Figura 71 - Isotermas para 30 minutos após a descarga</b>             | <b>91</b> |
| <b>Figura 72 - Escoamento superficial na configuração livre</b>          | <b>92</b> |
| <b>Figura 73 - Escoamento de fundo na configuração livre</b>             | <b>93</b> |
| <b>Figura 74 - Escoamento superficial na configuração tipo S</b>         | <b>94</b> |
| <b>Figura 75 - Escoamento de fundo na configuração tipo S</b>            | <b>95</b> |
| <b>Figura 76 Comparação do número de pond com valores da literatura</b>  | <b>98</b> |

## GLOSSÁRIO DE ABREVIACÕES E SIMBOLOS

- $\beta$  : Coeficiente de expansão térmica da água
- $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzman;
- $\rho$  : Densidade da água;
- $\varepsilon$  : Emissividade média da atmosfera;
- $\varepsilon_{\text{água}}$  : Emissividade da água;
- $\Delta T_o$  : Diferença entre a água na entrada e na saída da lagoa.
- $\Delta T_v$  : Diferença de temperatura entre o fundo e a superfície;
- $b_o$  : Largura do canal de descarga.
- $C_1$  : Constante de Bowen
- $C$  : Fração do céu encoberta
- $D_v$  : Diluição vertical de entrada (adimensional);
- $e_s$  : Pressão de saturação de vapor para a temperatura de água;
- $e_z$  : Pressão de vapor para uma altura  $z$ .
- $F(W_z)$  : Função velocidade do vento
- $f_i$  : Coeficiente de cisalhamento interno
- $g$  : Aceleração da gravidade
- $H$  : Profundidade da lagoa
- $h_o$  : Profundidade do canal de descarga;
- $K$  : Constante com valores entre 0,04 - 0,25.
- $L$  : Comprimento do caminho da água



$q_a$  : Radiação atmosférica;

$q_{ac}$  : Radiação atmosférica em céu aberto;

$q_{ar}$  : Radiação atmosférica refletida

$q_{ar}$  : Radiação atmosférica refletida;

$q_b$  : Fluxo de calor advectado do corpo d'água para o fundo

$q_{br}$  : Radiação de ondas longas emitida pela superfície da água;

$q_c$  : Fluxo de calor devido a condução;

$q_{ci}$  : Fluxo de calor advectado na saída do corpo d'água;

$q_{co}$  : Fluxo de calor advectado na entrada do corpo d'água;

$q_e$  : Fluxo de calor devido à evaporação;

$q_m$  : Fluxo de calor advectado do fundo para o corpo d'água;

$Q_o$  : Vazão de entrada

$q_s$  : Quantidade efetiva de radiação solar;

$q_s$  : Radiação solar incidente (ondas curtas);

$q_{sc}$  : Radiação solar máxima de um local;

$q_{sr}$  : Radiação solar refletida

$R$  : Razão de Bowen

$T_a$  : Temperatura absoluta do ar.

$T_{av}$  : Temperatura virtual do ar.

$T_d$  : Temperatura ambiente de ponto de orvalho

$T_e$  : Temperatura de equilíbrio

$T_o$  : Temperatura de entrada

$T_s$  : Temperatura absoluta da superfície da água.

$T_{sv}$  : Temperatura virtual da superfície da água;

$w$  : Largura da lagoa

$W_z$  : Velocidade do vento para uma altura  $z$ ;

## RESUMO

O presente trabalho compreendeu o desenvolvimento de uma instrumentação automática, que realizou a medida e a aquisição de dados de temperatura, com a finalidade de levantar as características hidrotérmicas de um modelo reduzido de lagoa de resfriamento rasa.

Foram estudados os comportamentos transiente e permanente na saída do modelo, o tempo de residência, o perfil térmico de profundidade, a formação de isotermas e o resfriamento ao longo do escoamento. Os estudos foram realizadas em diferentes configurações de escoamento e em diferentes níveis de vazão de entrada, mantendo-se a temperatura de entrada constante.

As características dinâmicas foram avaliadas pelo estudo do escoamento superficial e do escoamento de fundo, por meio do movimento de partículas na superfície e de plumas coloridas formadas pela dissolução de permanganato de potássio no fundo do modelo.

A instrumentação desenvolvida em interface com um microcomputador, mostrou-se bastante eficiente no processo de medida da temperatura e as análises das características do modelo apresentaram um comportamento similar ao de uma lagoa de resfriamento real.

## ABSTRACT

This work presents the development of a computer aided instrumentation of measurement and acquisition of temperature data.

The instrumentation was used on the study of hydrothermal characteristics of a reduced model of shallow cooling ponds. In this study were analysed the transient and steady state behavior of the output temperature, the residence time, the thermal profile, the isothermals and the temperature along the flowpath.

The dynamics aspects of the flow were also analysed through the motion of buoyant particles on the surface and the position of plume created from the dissolution of potassium permanganate crystal, on the bottom.

The instrumentation was efficient and the model has showed a behavior similar to the observed in real shallow cooling ponds

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente a poluição térmica dos corpos d'água vem se tornando cada vez mais grave, devido ao aumento de atividades que utilizam a água para o resfriamento de seus processos. Esta prática é comum nas usinas termoelétricas, usinas termonucleares, indústrias siderúrgicas, têxteis, sucroalcooleiras, etc.

Normalmente a água utilizada nos processos de trocas de calor é devolvida ao meio ambiente apresentando uma temperatura acima de um corpo d'água natural. Seu despejo direto em um rio ou lago causa um desequilíbrio no meio, podendo ser responsável direta ou indiretamente por um acidente ecológico.

Legislações modernas, baseadas em estudos de impacto ambiental, definem a quantidade e temperatura máximas que podem ser despejadas em um corpo d'água, para não causar desequilíbrio significativo no meio, evitando deste modo, um acidente ecológico.

Estas legislações dependem do País e da região. No Brasil o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da resolução número 20, de 18 de junho de 1986, estabelece por meio do artigo 12 que:

“Os efluentes de qualquer fonte poluente somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água desde que sua temperatura seja inferior a 40°C, sendo que a elevação causada no corpo receptor não deverá exceder 3°C”.

Deste modo estas legislações obrigam que a água utilizada em processos de trocas de calor dissipe o calor absorvido, até ficar dentro dos padrões permitidos por lei, podendo deste modo, ser descartada em corpos d'água natural.

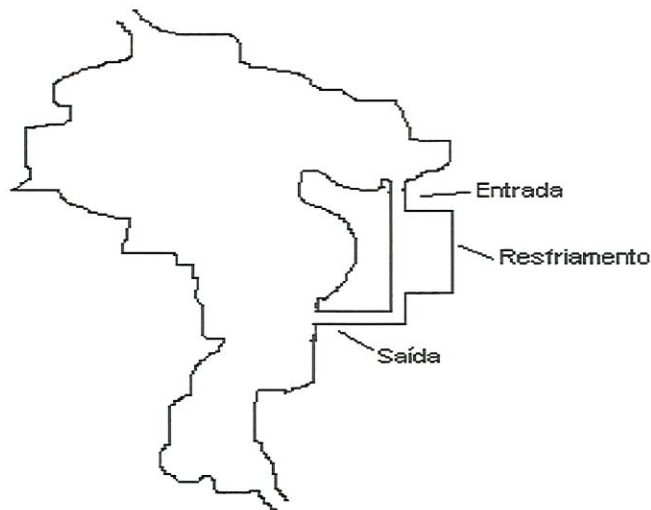
A dissipação do excesso de calor da água pode ser realizada em ciclo fechado ou em ciclo aberto. Em ciclo fechado, a água sai do processo de troca

de calor, entra no corpo d'água, dissipa o excesso de calor com a atmosfera e retorna à entrada do processo. Em *ciclo aberto*, a água com excesso de calor entra no corpo d'água e segue o escoamento natural sem retornar à entrada do processo.

Entre as várias técnicas empregadas para a dissipação de calor da água, as mais utilizadas são: torres de resfriamento, lagos e lagoas de resfriamento. Geralmente as torres e as lagoas de resfriamento utilizam ciclo fechado, já os lagos de resfriamento utilizam ciclo aberto.

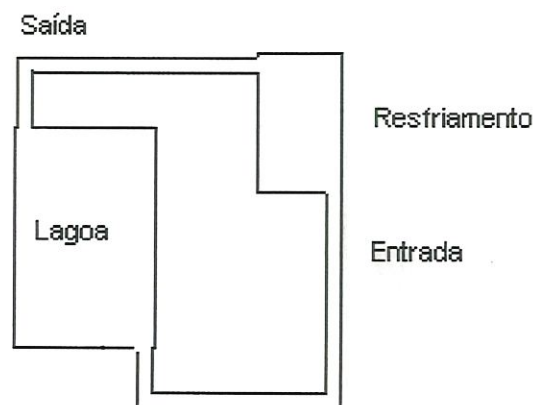
Os lagos de resfriamento (Fig 1), são na maior parte, formados pelo represamento de um curso d'água natural (rio ou córrego), originando um reservatório artificial. Um lago de resfriamento tem como características físicas: forma irregular, grande profundidade e elevado tempo de residência.

Os lagos são empregados em inúmeras atividades tais como, geração de energia, irrigação, abastecimento, recreação, piscicultura, etc. Estas atividades requerem que a temperatura da água fique dentro de certos limites, obrigando a aplicação de legislações mais rígidas quanto as quantidades e temperaturas de descargas permitidas.



**Figura 1:** Lago de Resfriamento (Ciclo Aberto)

As lagoas de resfriamento (Fig 2), são necessariamente represamentos artificiais, com tamanhos menores que os lagos, possuindo forma mais regular, pequena profundidade e baixo tempo de residência. Pelo fato de operarem em circuito fechado, as legislações ambientais geralmente não se aplicam internamente as lagoas, podendo desta forma, receberem uma maior carga térmica.



**Figura 2:** Lagoa de Resfriamento (Ciclo Fechado)

Com a crescente preocupação com o meio ambiente, as autoridades bem como a população, buscam cada vez mais, o cumprimento destas legislações ambientais, obrigando que as atividades que utilizam a água em processos de trocas de calor cumpram as leis.

O mercado internacional esta exigindo das empresas a certificação da ISO 9000 que são normas de controle de qualidade dos produtos. A tendência mundial para um futuro próximo é que estas indústrias e empresas também se enquadrem nas normas da ISO 14000, que define o controle ambiental, neste caso as indústrias e empresas terão que produzir sem que seu produto final e os resíduos gerados pela sua produção, agridam o ambiente.

Prevê-se a união da ISO 9000 com a ISO 14000 em uma única norma para deste modo se obter a certificação da chamada “Qualidade Total”, pré-

requisito obrigatório para que Países do primeiro mundo importem seus produtos.

Dentro deste contexto, a *lagoa de resfriamento* poderá ser uma das técnicas aplicadas no Brasil. As lagoas de resfriamento que existem em operação no país utilizam conceitos e informações de países como os Estados Unidos e Austrália, nas quais o clima difere muito do nosso.

Para conhecer o comportamento de uma lagoa de resfriamento num clima tropical, foi desenvolvida uma instrumentação eletrônica que em conjunto com um microcomputador, dotado de um programa de aquisição montado para este fim, realiza medidas de temperatura em inúmeras sondas termopares que podem ser posicionadas em diferentes pontos no interior de uma lagoa de resfriamento, possibilitando o levantamento do comportamento térmico da lagoa.

A instrumentação, após ser testada em um modelo reduzido montado em laboratório, mostrou um ótimo funcionamento no processo de medidas e aquisição dos dados de temperatura.

Com as análises de laboratório, o equipamento mostrou ser aplicável para o levantamento de características térmicas de uma lagoa de resfriamento real.



## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve por objetivo o projeto e construção de uma instrumentação eletrônica, controlada por um microcomputador dotado de software de aquisição de dados. A instrumentação tem a característica de realizar o chaveamento de 100 sondas termopares. O sinal proveniente de cada sonda é amplificado, digitalizado e gravado em um arquivo de dados. As sondas termopares são distribuídas no interior de uma lagoa de resfriamento, possibilitando assim, uma análise térmica da mesma.

Os testes do equipamento foram realizados em um modelo reduzido de lagoa de resfriamento, que recebeu em sua entrada simulações de descargas térmicas. Com o equipamento em funcionamento, mediu-se a temperatura ao longo do tempo nos diversos pontos da malha de termopares.

O modelo foi montado para possibilitar várias configurações de escoamento recebendo diferentes vazões de entrada.

Também foi objetivo realizar a estimativa do campo de escoamento superficial e próximo ao fundo do modelo, por análise do movimento de partículas traçadoras.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para entender como interagem os mecanismos de trocas de calor, massa e quantidade de movimento existentes nas lagoas de resfriamento é necessário o conhecimento dos fundamentos teóricos relacionados aos corpos d'água em geral. A partir desta teoria é possível compreender e classificar os mecanismos que regem o comportamento dinâmico e de trocas de calor que ocorrem nestes corpos d'água de características particulares.

#### 3.1. Balanço de Calor num Corpo D'Água

No estudo dos mecanismos térmicos que atuam em um corpo d'água a análise do balanço de calor é o ponto de partida para a compreensão do seu funcionamento. A figura 3 ilustra o balanço de calor de um corpo d'água no meio ambiente [1].

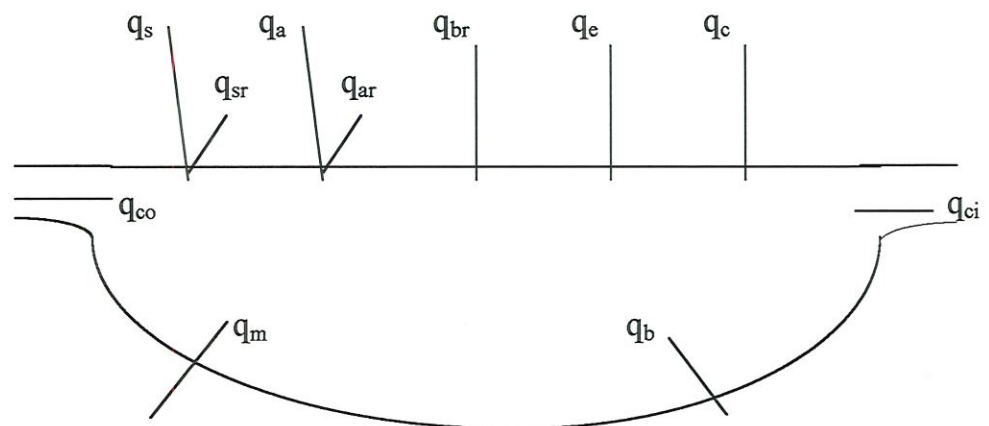


Figura 3 - Balanço total de calor num corpo d'água

Na figura tem-se

- $q_e$  = Fluxo de calor devido à evaporação;
- $q_c$  = Fluxo de calor devido a condução;
- $q_s$  = Radiação solar incidente (ondas curtas);
- $q_{sr}$  = Radiação solar refletida;
- $q_a$  = Radiação atmosférica (onda longas);
- $q_{ar}$  = Radiação atmosférica refletida;
- $q_{br}$  = Radiação de ondas longa emitida pela superfície da água;
- $q_{co}$  = Fluxo de calor advectado na entrada do corpo d'água;
- $q_{ci}$  = Fluxo de calor advectado na saída do corpo d'água;
- $q_m$  = Fluxo de calor advectado do fundo para o corpo d'água;
- $q_b$  = Fluxo de calor advectado do corpo d'água para o fundo.

O balanço de calor é dado por:

$$q_n = q_s - q_{sr} + q_a - q_{ar} - q_{br} - q_e - q_c + q_{co} - q_{ci} + q_m - q_b \quad (1)$$

onde  $q_n$  é a quantidade líquida de calor recebido ou cedido pelo corpo d'água.

### 3.1.1. Evaporação

A evaporação é um fenômeno de mudança de fase da água (líquido-vapor), que ocorre sempre quando a pressão de vapor parcial do ar fica menor que a pressão de saturação de vapor para a temperatura em que se encontra a superfície da água, nestas condições a água evapora para o ar.

O processo de evaporação em um corpo d'água sempre resulta em uma perda de calor, pois o calor latente de vaporização é retirado do corpo d'água.

Juntamente com a mudança de estado da água na interface ar-água atuam os mecanismos de convecção forçada e convecção livre que resultam no fenômeno da evaporação propriamente dita.

A convecção forçada é realizada por ação do vento que arrasta o vapor d'água da superfície mantendo as condições de não saturação pelo vapor, permitindo que mais água evapore na interface. A convecção livre ocorre mesmo na ausência de vento devido a diferença de densidade entre o vapor e o ar acima deste, como o vapor tem menor densidade ele é levado para regiões mais elevadas.

O fluxo de calor devido a evaporação da água [1,2], é dada pela expressão é dado por:

$$q_e = F(W_z) (e_s - e_a) \quad (2)$$

Na qual:

$W_z$  = Velocidade do vento para uma altura de referência;

$F(W_z)$  = Função velocidade do vento (que inclui efeitos de convecção livre e forçada);

$e_s$  = Pressão de saturação de vapor para a temperatura de água;

$e_a$  = Pressão de vapor do ar.

Nos corpos d'água naturais em que não ocorre descarga térmica, a convecção forçada é predominante e a função velocidade do vento [1] é dada pela equação abaixo, na qual  $a$  e  $b$  são parâmetros obtidos experimentalmente.

$$F(W_z) = a + b W_z \quad (3)$$

Para corpos d'água de grande a constante  $a$  normalmente é desprezada.

Em experimentos com descargas térmicas em laboratório a convecção livre é dominante, já se ocorrer uma descarga em um corpo d'água em céu aberto a convecção livre passa a ter mesmo peso que a convecção forçada [1].

No caso da convecção livre estudos [2,16] mostraram que o parâmetro  $a$  pode ser calculada pela equação:

$$a = 22,4 \Delta\theta_v^{1/3} \quad (4)$$

onde:

$$\Delta\theta_v = T_{sv} - T_{av} \quad (5)$$

Em que,

$T_{sv}$  é a temperatura virtual de um filme de vapor em contato com a superfície da água da superfície da água;

$T_{av}$  é a temperatura virtual do ar.

A temperatura virtual do ar úmido é definida como sendo a temperatura do ar seco na qual a densidade é igual a do ar úmido

A temperatura virtual pode ser estimada a partir da temperatura do ar, da superfície e as pressões de vapor e a pressão atmosférica :

$$T_{sv} = (T_s + 460)/(1 - 0,378 e_s/p) \quad (6)$$

$$T_{av} = (T_a + 460)/(1 - 0,378 e_a/p) \quad (7)$$

Neste caso o fluxo de calor pela evaporação com convecção livre pode ser expresso pela equação:

$$q_e = 22,4 \Delta\theta_v^{1/3} (e_s - e_a) \quad (8)$$

Quando ocorre a ação combinada da convecção livre e da convecção forçada a quantidade de calor evaporada é dada pela equação:

$$q_e = [22,4 \Delta\theta_v^{1/3} + b W_z] (e_s - e_z) \quad (9)$$

A evaporação de corpos d'água é um assunto que requer muito estudo, não existindo ainda um equacionamento exato do problema. Por este motivo, na literatura, encontra-se um grande número de equações empíricas.

### 3.1.2. Condução

O calor sensível é conduzido pela superfície de um corpo d'água quando existe uma diferença de temperatura entre a superfície da água e o ar imediatamente acima desta.

A quantidade de calor que é conduzida depende diretamente da diferença de temperatura e da velocidade do vento na interface ar-água. Como estes fatores são os mesmos que influenciam o fenômeno da evaporação, a determinação de uma expressão do calor transmitido por condução num corpo d'água é obtida por meio de uma relação entre a quantidade de calor transmitida por evaporação e por condução. Esta relação é conhecida como relação de Bowen [3] e é expressa por:

$$R = q_c / q_e = C_1 (T_s - T_a) / (e_s - e_a) \quad (10)$$

Em que,

$$C_1 = \text{Constante de Bowen (0,255 mm Hg/}^\circ\text{F)}$$

Combinando as equações 9 e 10 obtém-se a expressão para o calor conduzido entre a superfície de um corpo d'água.

$$q_c = C_1 F(W_z) (T_s - T_a) \quad (11)$$

### **3.1.3. Radiação**

Nos processos de troca de calor por radiação em um corpo d'água existem vários tipos de radiação que contribuem no balanço de calor. As parcelas de radiação são:

Radiação solar incidente ( radiação de ondas curtas);

Radiação solar refletida;

Radiação atmosférica incidente (radiação de ondas longas);

Radiação atmosférica refletida;

Radiação de ondas longas emitida pelo corpo d'água.

#### **3.1.3.1. Radiação Solar**

A radiação solar incidente é parte da radiação solar recebida no topo da atmosfera. Esta radiação ao atravessar a atmosfera é absorvida por gases constituintes do ar, vapor d'água, nuvens e poeira. Como resultado destes complexos processos de absorção a radiação que chega à superfície da terra é composta de uma parte direta e de uma parte difusa o que dificulta um equacionamento exato do fenômeno.

Outro fator que influencia a intensidade da radiação solar é a chamada altitude solar, que determina o ângulo de incidência dos raios solares na superfície da terra. Esta altitude solar muda de acordo com a latitude do local, período do ano e hora do dia [15].

As nuvens tem grande influencia na atenuação da radiação incidente na superfície da terra. Uma expressão empírica [4] é utilizada no cálculo da radiação solar, esta leva em conta o efeito das nuvens e é dada por :

$$q_s = q_{sc} (1 - 0,65 C^2) \quad (12)$$

Na qual:

$q_s$  é a quantidade efetiva de radiação solar;

$q_{sc}$  é a radiação solar máxima de um local, obtida da curva de radiação solar da localidade;

$C$  é a fração do céu encoberta.

### 3.1.3.2. Radiação Solar Refletida

Da totalidade da radiação solar (ondas curtas) que atinge a superfície de um corpo d'água, parte é refletida pela superfície da água (espelho d'água) e parte por partículas e bolhas que existem abaixo da camada superficial da água.

Existem muitas variáveis que influenciam a reflexividade da superfície da água, destacando-se a altitude solar, a turbidez atmosférica, a velocidade do vento, o tipo de nuvens que encobre a localidade, etc.

Em média a parte refletida corresponde a 6% da radiação incidente [5], obtendo-se assim:

$$q_{sr} = 0,06 q_s \quad (13)$$

Na qual:

$q_{sr}$  é a radiação solar refletida.



### 3.1.3.3. Radiação Atmosférica

A radiação térmica da atmosfera terrestre é a componente mais importante no balanço de calor de um corpo d'água. Sua origem é devido a absorção e emissão, principalmente, de vapor d'água, dióxido de carbono e ôzônio, presentes na atmosfera. A energia fornecida pela radiação atmosférica é em média 50% mais intensa que a radiação solar [6].

Uma expressão analítica é de difícil obtenção devido a complexidade de descrição dos processos de absorção e emissão dos gases. No entanto é usada uma expressão que tem por base a equação de emissão de corpo negro de Stefan-Boltzman.

$$q_{ac} = \varepsilon \sigma T_{ar}^4 \quad (14)$$

Na qual:

$q_a$  é a radiação atmosférica em céu aberto;

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman;

$\varepsilon$  é a emissividade média da atmosfera;

$T_{ar}$  é a temperatura absoluta do ar.

Nas condições de céu nublado o efeito das nuvens é o de aumentar a radiação de ondas longas, pois elas tem um comportamento próximo a um corpo negro.

A radiação atmosférica pode ser dada por uma expressão que leva em conta os efeitos das nuvens [4].

$$q_a = q_{ac} (1,0 + K C^2) \quad (15)$$

Na qual:

$q_a$  é a radiação atmosférica;

$q_{ac}$  é a radiação atmosférica em céu aberto

$K$  é uma constante que assume valores entre 0,04 - 0,25.

#### 3.1.3.4. Reflexão da Radiação Atmosférica

A reflexividade das ondas longas pela água é aproximadamente 3% da quantidade incidente [5], assim tem-se:

$$q_{ar} = 0,03 q_a \quad (16)$$

Na qual:

$q_{ar}$  é a radiação atmosférica refletida.

#### 3.1.3.5. Radiação de Ondas Longas da Água

A água também emite radiação de ondas longas que pode ser expressa em termos da equação de Stefan-Boltzman, levando-se em conta a emissividade da água que independe da temperatura e de sólidos dissolvidos na mesma. Deste modo tem-se:

$$q_{br} = \varepsilon_{\text{água}} \sigma T_{sa}^4 \quad (17)$$

Na qual:

$q_{br}$  é a radiação de ondas longas emitida pela água;

$\varepsilon_{\text{água}} = 0,97$ ;

### 3.1.4. Advecção nos Corpos D'Água

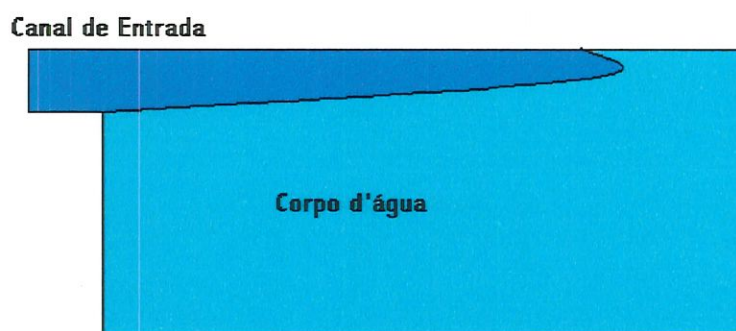
O processo advectivo num corpo d'água é responsável pela entrada e saída da água neste corpo sem considerar processos de superfície.

A água pode entrar num corpo d'água de dois modos: por um canal de entrada ou pelo fundo proveniente do lençol freático. A retirada da água de um corpo também se dá de três modos: pela evaporação, em uma saída a jusante do corpo ou pela infiltração pelo fundo saindo para o lençol freático.

Normalmente esta entrada e saída pelo fundo é determinada pelas condições climáticas (época de seca ou chuva).

A entrada da água proveniente de um canal, dependendo da temperatura de sua água com relação a da água do corpo receptor, pode se dar de três modos diferentes [7].

Se a temperatura de entrada for maior que a temperatura do corpo a água entra pela parte superior (superficial) devido ao fato de sua densidade ser menor, assim tem-se uma entrada superficial.



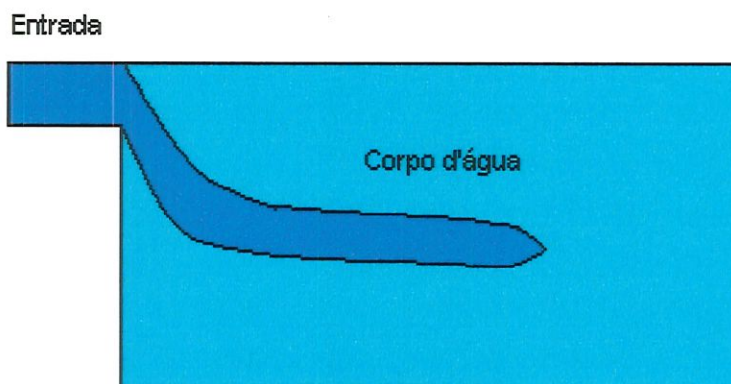
**Figura 4 - Entrada superficial.**

Se a água da entrada possuir temperatura inferior à do corpo, esta entrada se dá pelo fundo, porque neste caso a densidade da água de entrada é maior, assim tem-se uma entrada submersa.



**Figura 5 - Entrada submersa.**

Um terceiro tipo de entrada de um canal é observado quando o corpo receptor é estratificado térmicamente. Neste caso se a temperatura de entrada da água for intermediária entre as temperaturas do fundo e da superfície da água do corpo receptor, ocorre uma entrada em uma posição entre o fundo e a superfície.



**Figura 6 - Entrada intermediária**

No caso das lagoas de resfriamento onde a temperatura de entrada da água é muito superior à da própria lagoa tem-se a de entrada superficial, que uma das características das lagoas de resfriamento.

### 3.1.5. Fluxo Líquido de Calor Linearizado

O equacionamento dos termos presentes na equação 1 na sua maioria não são lineares por este motivo é usada uma aproximação linear desenvolvida por Edinger [8] que é baseada nos conceitos de temperatura de equilíbrio e de coeficiente superficial de trocas térmicas.

A temperatura de equilíbrio é definida como sendo a temperatura da superfície da água na qual o fluxo líquido de calor é zero, esta temperatura depende das condições meteorológicas sendo portanto variável no tempo. Se a temperatura da superfície da água é maior que a temperatura de equilíbrio a superfície perderá calor e a temperatura da água cairá caso contrário a temperatura da água irá aumentar.

O coeficiente superficial de trocas térmicas é definido como a variação incremental na troca líquida de calor induzida por uma variação incremental na temperatura da superfície.

A expressão simplificada é definida por:

$$q_n = K ( T_s - T_e ) \quad (18)$$

Na qual:

$T_e$  é a temperatura de equilíbrio;

$T_s$  é a temperatura de superfície da água.

$K$  é o coeficiente superficial de trocas térmicas

A temperatura de equilíbrio pode ser calculada fazendo-se  $q_n$  igual a zero e  $T_s = T_e$ . A temperatura pode ser calculada pelo método iterativo de Ryan e Harleman [1] no qual :

$$T_e = q_{nr} + F(W) [ \beta^* T_d + 0,255 T_a ] - 1600 / 23 + F(W) [ \beta^* + 0,255 ] \quad (19)$$

Na qual:

$T_e$  é a temperatura de equilíbrio em °F;

$T_d$  é a temperatura ambiente de ponto de orvalho em °F.

Os termos  $q_n$  e  $\beta^*$  são dados por:

$$q_{nr} = q_s - q_{sr} + q_a - q_{ar} - q_{br} \quad (20)$$

$$\beta^* = 0,255 - 0,0085 [ T_e + T_d / 2 ] + 0,000204 [ T_e + T_d / 2 ]^2 \quad (21)$$

Toma-se um valor inicial para  $T_e$ , calcula-se  $\beta^*$  e  $q_{nr}$  e substitui-se na equação 19, obtém-se  $T_e$ , este valor é substituído na eq. 21 calculando-se um novo  $\beta^*$ , o procedimento é repetido até  $T_e$  convergir para um valor fixo.

Faz-se a hipótese do valor de  $K$  ser linear [9] e é obtido a partir da equação :

$$K = - (q_{nr} - q_e - q_c) / T_s - T_e \quad (22)$$

Deste modo pode-se calcular o fluxo de calor pela superfície que juntamente com o calor advectado dá o balanço total de calor num corpo d'água.

Existem tabelas da temperatura de equilíbrio calculadas para condições de laboratório a qual leva em conta a temperatura da superfície e a umidade relativa do ar [1].

### 3.1.6 Fórmulas Utilizadas no Cálculo de K

O coeficiente de trocas de calor superficiais, depende do fluxo de calor devido a radiação é dado por:

$$q_{nr} = q_{ent} - q_{br} \quad (23)$$

Na qual:

$$q_{ent} = q_s - q_{sr} + q_a - q_{ar} \quad (24)$$

No fluxo de radiação que entra em um corpo d'água em condições de laboratório [9] a radiação de ondas curtas pode ser desprezada e a radiação de ondas longas obedece a lei de Stefan-Boltzman, considerando a emissividade do laboratório igual a 0,97, assim tem-se:

$$q_{ent} = 4,0 \times 10^{-8} (T_a + 460)^4 \quad (25)$$

com  $T_a$  em temperatura absoluta

No caso da radiação emitida pelo corpo d'água também é usada a lei de Stefan-Boltzman, considerando a emissividade da água também 0,97, deste modo tem-se:

$$q_{br} = 4,0 \times 10^{-8} (T_s + 460)^4 \quad (26)$$

Na qual:

$T_s$  = temperatura superficial média da lagoa ( em Kelvin )

Para condições de laboratório o fluxo de calor qual sai devido a evaporação e a condução são calculados por uma fórmula [1] que leva em conta os dois fenômenos, uma vez que estes se relacionam pela constante de Bowie, esta expressão é dada por:

$$q_{e+c} = f(w) [ (e_s - e_a) + 0,255 (T_s - T_a) ] \quad (27)$$

Na qual:

$q_{e+c}$  = Soma dos efeitos da evaporação e da condução

### **3.2. Processos de Estratificação Térmica**

A estratificação é uma característica dos corpos d'água em geral, que consiste da formação de duas regiões distintas de temperatura ao longo da sua profundidade.

#### **3.2.1. Corpos d'água naturais**

Um corpo d'água natural pode do ponto de vista térmico estar estratificado verticalmente ou não (desestratificado), esta alternância das condições ocorre normalmente em ciclo anual.

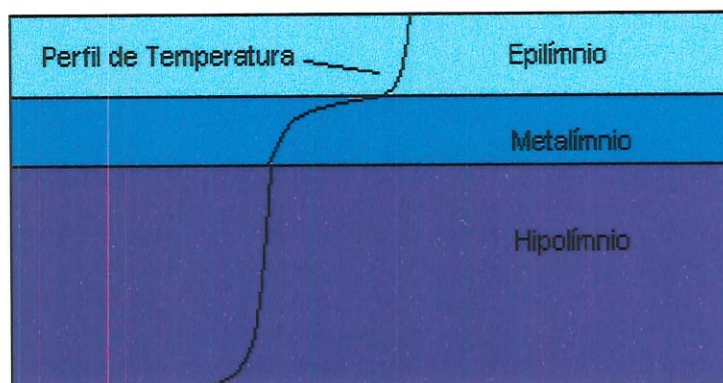
O processo de estratificação é determinado pela variação das condições meteorológicas que é determinada pela entrada e saída de calor pela superfície da água.

O processo de estratificação tem início quando ocorre perturbação sobre um corpo d'água que apresenta homogeneidade vertical de temperatura, ou seja a água possui aproximadamente a mesma temperatura ao longo do perfil vertical, como ocorre no período do inverno. Com a chegada do verão



ocorre o aumento da radiação solar e atmosférica, resultando no aumento da temperatura das camadas superficiais da água.

Este aumento de temperatura é propagado gradualmente para as camadas inferiores por mecanismos de difusão turbulenta e advecção vertical de calor. A camada superficial fica com a temperatura mais elevada que as camadas inferiores resultando numa diferença de densidade entre estas. Esta diferença de densidade permite a formação de duas regiões bem distintas ao longo do perfil de profundidade. A região superior é chamada epilimnio (maior temperatura e menor densidade), a região inferior é chamada hipolimnio (menor temperatura e maior densidade), entre estas duas regiões distintas existe uma região mais estreita chamada metalimnio, onde se observa uma abrupta queda da temperatura. Uma estrutura de estratificação é apresentada na Figura 7.



**Figura 7** - Estrutura de estratificação de um corpo d'água.

O processo de desestratificação ocorre principalmente por instabilidade superficiais tal como o efeito do vento formando ondas superficiais que quebram na superfície e induzem turbulência nas camadas superiores.

Quando a temperatura de camada superficial fica mais fria que as camadas inferiores a diferença de densidade resulta em um movimento convectivo vertical misturando a água das camadas superiores com a água das

camadas inferiores, com isto ocorre uma tendência há uniformizar a temperatura ao longo do perfil vertical.

A queda da temperatura da água superficial se deve a diminuição do fluxo de calor que entra no corpo d'água, que ocorre no período de inverno fazendo com que o corpo d'água natural volte a ter perfil uniforme de temperatura.

### **3.2.2. Lagoas de Resfriamento**

Os mesmos fatores que influenciam um corpo d'água natural também influenciam as lagoas de resfriamento, mas a principal fonte de transferência de calor é a entrada de um fluxo de água com temperatura mais elevada que a água da lagoa, resultando num gradiente de temperatura forçado.

A água aquecida entra na lagoa através de um canal de descarga produzindo, próximo a esta entrada, uma turbulência localizada criando uma forte região de mistura.

A diferença de temperatura entre a água de entrada e a água de lagoa resulta na formação de uma camada superficial de maior temperatura que as camadas inferiores, como apresentado na Figura 4.

A perda de calor pela superfície é o principal processo de retirada do excesso de calor da água em uma lagoa de resfriamento. A retirada da água (já resfriada) é normalmente feita por uma saída no fundo da lagoa, onde a água esta com maior densidade, por consequência da menor temperatura.

### 3.3. Aspectos Teóricos das Lagoas de Resfriamento

Um amplo estudo sobre lagoas de resfriamento foi realizado na década de 70 e início da década de 80, por vários autores nos EUA, principalmente no MIT (Massachusetts Institute of Technology). Estes estudos estabeleceram conceitos e classificações para as lagoas de resfriamento.

#### 3.3.1. Classificação das Lagoas de Resfriamento

As lagoas de resfriamento são classificadas em lagoas rasas e lagoas profundas [10] Esta classificação não leva em conta somente a profundidade, mas também a forma, o tamanho, o gradiente de temperatura da descarga, a vazão da descarga, mistura de entrada, etc.

As *lagoas de resfriamento profundas* caracterizam-se por apresentarem estratificação térmica bem definida, com um acentuado gradiente vertical de temperatura [17, 18].

O grau de estratificação de uma lagoa pode ser medido pelo gradiente normalizado de temperatura,  $\theta$ , dado pela equação

$$\theta = \Delta T_v / \Delta T_o \quad (28)$$

Em que,

$\Delta T_v$  é a média diferença de temperatura entre o fundo e a superfície;

$\Delta T_o$  é a diferença entre a água na entrada e na saída da lagoa.

Quanto maior esta relação mais estratificada é a lagoa. Esta grandeza pode ser relacionada com um adimensional obtido de variáveis independentes que descrevem a dinâmica da lagoa de resfriamento [11]. Este adimensional é o chamado “número de pond”, definido pela equação:

$$P = ( f_i \cdot Q_o^2 \cdot D_v^3 \cdot L / 4 \cdot \beta \cdot \Delta T_o \cdot g \cdot H^4 \cdot w^2 )^{1/4} \quad (29)$$

Em que,

$f_i$  = Coeficiente de cisalhamento interno (adimensional);

$Q_o$  = Vazão de entrada ( $m^3/s$ );

$D_v$  = Diluição vertical de entrada (adimensional);

$L$  = Comprimento do caminho da água (m);

$\beta$  = Coeficiente de expansão térmica da água ( $^{\circ}C^{-1}$ );

$T_o$  = Temperatura de entrada ( $^{\circ}C$ );

$g$  = Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$H$  = Profundidade da lagoa (m);

$w$  = Largura da lagoa (m).

O número de pond inclui 4 fatores:

Considerando inicialmente o número de Froude densimétrico:

$$Fr' = Q_o^2 / \beta \cdot \Delta T_o \cdot g \cdot H^3 \cdot w^2 \quad (30)$$

a) O termo  $Q_o^2 / H^2 \cdot w^2$  descreve os efeitos da desestabilização térmica causada pela energia cinética do escoamento.

b) O termo  $\beta \cdot \Delta T_o \cdot g \cdot H^4 \cdot w^2$  esta relacionado com o efeito da estabilidade causado pela energia flutuante (potencial).

c) O fator  $D_v^3$  descreve a desestabilização causada pela agitação causada pela turbulência de entrada.

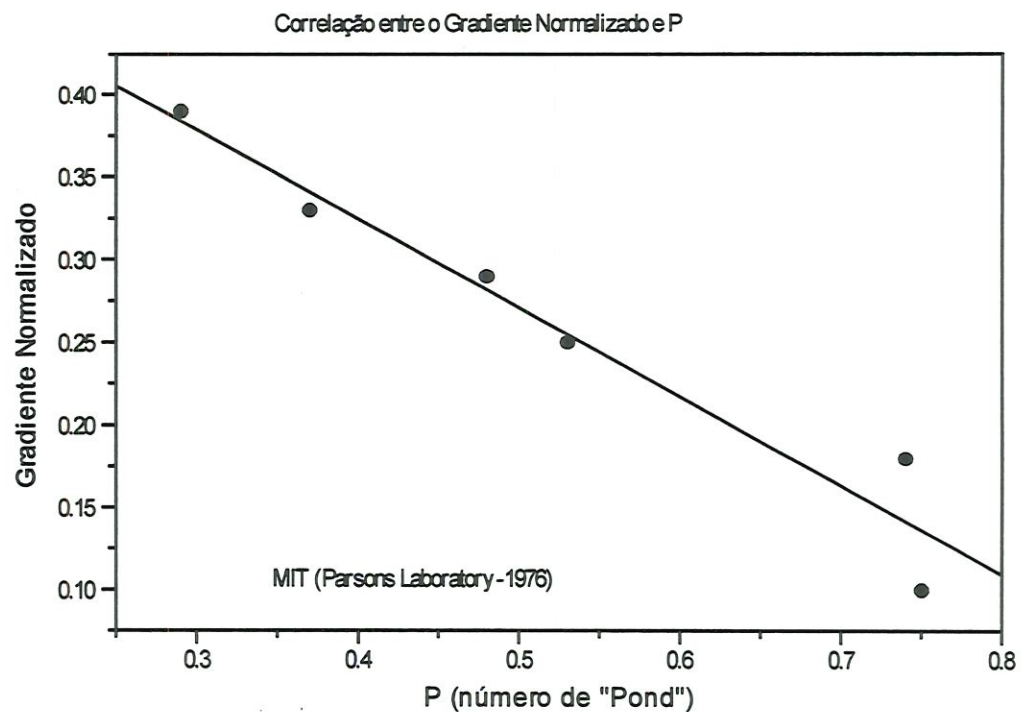
Este fator pode ser calculado em termos do número de Froude densimétrico [9], onde :

$$D_v = 1 + 1,2 (F_o' - 1) \quad (31)$$

Em estudos de lagoas de resfriamento [10], utiliza-se  $D_v = 1,5$

d) O parâmetro  $f_i / 4$  descreve o cisalhamento interno que gera turbulência e atua como um mecanismo de desestratificação.

A correlação experimental entre o gradiente normalizado e o número de pond é representada na Figura 8 [11].



**Figura 8** - Relação entre o gradiente normalizado e o número de pond

Do ponto de vista de sua estrutura térmica, uma *lagoa* é considerada *profunda* quando obedece o critério de  $P < 0,3$  [11].

Uma lagoa profunda leva em conta dois aspectos fundamentais:

i) A menor densidade da camada superficial, que possibilita a difusão da água aquecida por toda lagoa, assegurando que toda área superficial seja efetivamente utilizada para a dissipação do calor.

ii) A parte profunda fica isolada das variações diárias e das bruscas variações meteorológicas (temperatura do ar), respondendo somente a mudanças que ocorrem em escalas de tempo muito maior que o próprio tempo de residência da lagoa.

Estes tipos de lagoas são geralmente construídas artificialmente, pelo represamento de um rio ou corpo d'água.

Uma *lagoa rasa* pode ser classificada baseada no seu grau de estratificação em dois tipos:

- i) Parcialmente estratificada;
- ii) Totalmente misturada (Homogeneidade térmica em todo perfil).

De acordo com o número de “pond” a lagoa pode ser classificada como:

1.  $0,3 \leq P \leq 1,0 \Rightarrow$  Parcialmente estratificada;
2. Não possui camada superficial, mas apresenta variação térmica vertical:

$P > 1,0 \Rightarrow$  Totalmente misturada;

3. Não possui estratificação nenhuma, apenas variação horizontal de temperatura.

As lagoas de resfriamento rasas são geralmente artificiais e construídas para operar em circuito fechado.

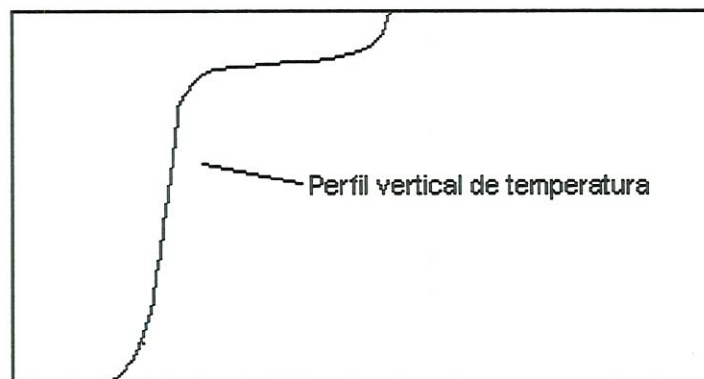
### 3.3.2. Estrutura Térmica das Lagoas de Resfriamento

Uma das principais características de uma lagoa de resfriamento é o gradiente de temperatura entre a descarga e a saída.

As mudanças de densidade da água são associadas diretamente com as variações de temperatura. Convecções superficiais forçam a água de maior temperatura ficar sobre a água de menor temperatura. Este mecanismo tende a estratificar verticalmente o corpo d'água, sendo intrínseca das lagoas de resfriamento.

Ryan [2], verificou experimentalmente a estrutura térmica de uma lagoa de resfriamento do tipo rasa e de uma lagoa profunda.

Na lagoa tipo profunda (fig 9), foram observados gradientes de temperatura nas direções horizontal e vertical. O gradiente horizontal tende a se manifestar em uma camada superficial relativamente fina, abaixo da qual a variação da temperatura ocorre principalmente na direção vertical.



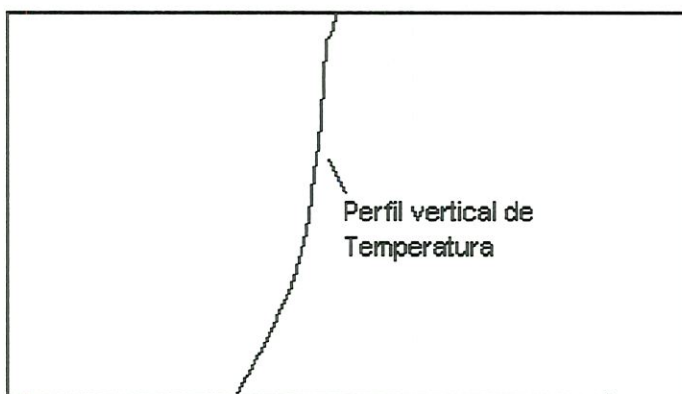
**Figura 9** - Estrutura Térmica de uma Lagoa Profunda

Na distribuição da temperatura superficial da água em função da área da lagoa, observam-se três zonas distintas de troca de calor:

- i) Campo próximo a saída da descarga onde há pouca perda de calor.
- ii) A região de mistura de entrada onde ocorre uma rápida variação de temperatura.
- iii) Campo distante superficial onde ocorre gradativamente troca de calor.

Após a região de mistura da entrada, a água fria superficial é forçada por convecção a mover-se para o fundo da lagoa, formando uma camada superficial de água mais quente sobre uma camada sub-superficial de água fria, a água da camada inferior mais fria é advectada para o ponto de saída da lagoa, otimizando sua capacidade de resfriamento.

Ao contrário das lagoas profundas, as lagoas rasas (fig. 10) não apresentam camada superficial, e a estratificação vertical é menor e pode ser variável ao longo do escoamento. As vezes a lagoa rasa assume um perfil de estratificação vertical considerada fraca que caracteriza uma lagoa totalmente misturada.



**Figura 10 - Estrutura Térmica de uma Lagoa Rasa**



### 3.3.3. Correntes de Escoamento em Lagoas de Resfriamento

As correntes na lagoas de resfriamento são resultados de três mecanismos [12,19]:

- i) Correntes induzidas por descarga de entrada
- ii) Correntes induzidas por diferença de densidade
- iii) Correntes induzidas pelo vento

A intensidade das correntes de entrada e as correntes densidade são importantes pois estão ligadas a estrutura térmica das lagoas.

Nas lagoas profundas as correntes de densidade prevalecem, já na lagoas rasas o escoamento é governado pelas correntes de entrada e suas ramificações que são vórtices gerados no ponto de descarga e da separação de escoamento que ocorre ao redor das chicanas.

As correntes induzida pelo vento podem assumir intensidade maior que as outras duas mas sua ocorrência é pouca e sua influência no comportamento é desprezível.

As correntes induzidas por descarga de entrada são ocasionadas pelo movimento causado pela descarga (jato) de entrada, como resultados deste tipo de correntes tem-se a formação de recirculações devido a formação de vórtices induzidos pela forte distribuição não uniforme de temperatura.

Uma lagoa pode ser classificada como uma lagoa de recirculação ou uma lagoa dispersiva (pouca ou nenhuma recirculação), de acordo cor a relação do comprimento  $L$  pela largura média  $W$ , deste modo tem-se:

- |                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| Se $L / W \leq 4$ | Lagoa de recirculação |
| Se $L / W > 4$    | Lagoa dispersiva      |

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos ensaios para os testes do equipamento desenvolvido, optou-se pelo uso de um modelo reduzido de uma lagoa de resfriamento, isto facilitou os ajustes necessários para um melhor desempenho do equipamento, também os aspectos econômicos como potência necessária e o espaço físico do laboratório influenciaram nesta escolha.

Os dados térmicos retirados permitiram o levantamento de algumas das características do modelo. No estudo da parte dinâmica do modelo foram feitas filmagens do movimento de partículas na superfície e do movimento de manchas da dissolução de pequenos cristais de permanganato de potássio próximo ao fundo do modelo.

O modelo possui forma retangular com dimensões 2,0 m x 1,0 m x 0,10 m, construído com madeira de construção naval e revestido com tinta emborrachada impermeável, é dotado de entrada de forma radial que garante uma melhor eficiência térmica [25], a saída de escoamento é realizada pelo fundo, o escoamento é modificado por um sistema de chicanas móveis, que permitem a formação de diversas configurações [24].

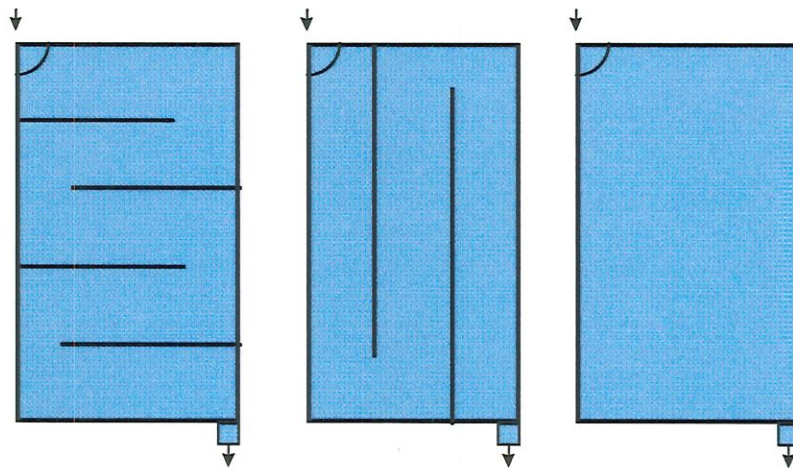


Figura 11: Configurações do escoamento

#### 4.1. Instrumentação Desenvolvida

Para obter as características térmicas de um corpo d'água é necessário conhecer a temperatura em várias posições. Manualmente para medir este campo de temperaturas em um mesmo instante seria impossível.

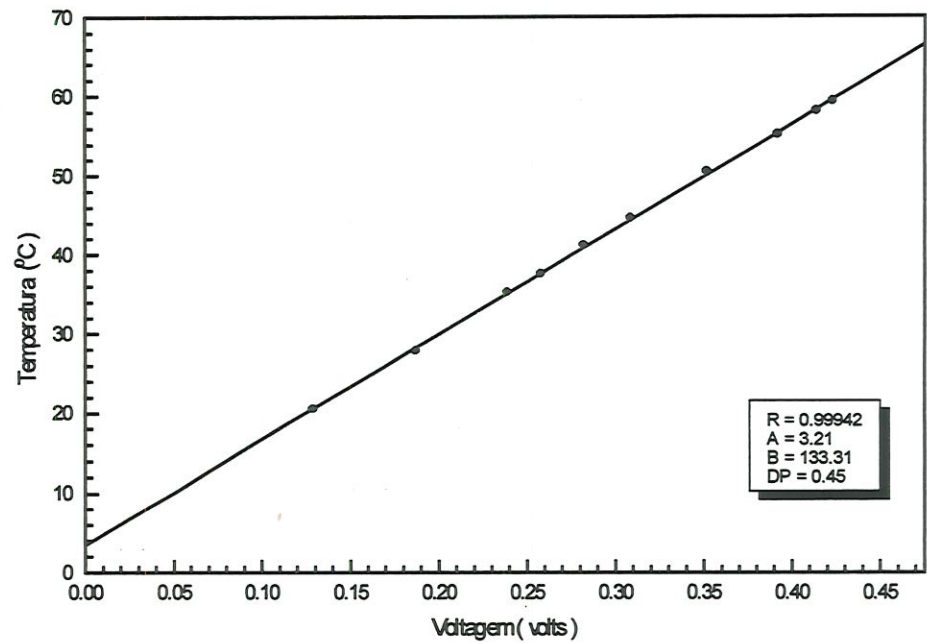
Assim projetou-se e desenvolveu-se uma bancada eletrônica que operando em conjunto com um microcomputador, realizou de modo automático medidas e aquisição da temperatura nos diversos pontos no modelo. O computador utilizado foi um AT 286 - 20 M Hz, que envia e recebe os sinais por meio de uma placa A/D D/A.

As medidas em 100 pontos são lidas sequencialmente uma a uma, com intervalo de tempo de 80 milisegundos entre cada medida, completando a coleta dos pontos em 8 segundos.

Em cada ponto são realizadas 25 medidas e retirada a média para minimizar erros relacionados a flutuações térmicas. O programa de controle foi montado em linguagem Pascal.

O sensor de temperatura escolhido foi o termopar cobre-constantan [20], devido ao seu pequeno tamanho (que não perturba o escoamento) e pela linearidade apresentada entre tensão e temperatura na faixa de trabalho (10 a 60°C), estes termopares foram confeccionados um a um tendo sua junção soldada em atmosfera inerte de argônio que garante uma solda livre de impurezas. Cada par de fios cobre-constantan foi passado por um espaguete para melhor proteção.

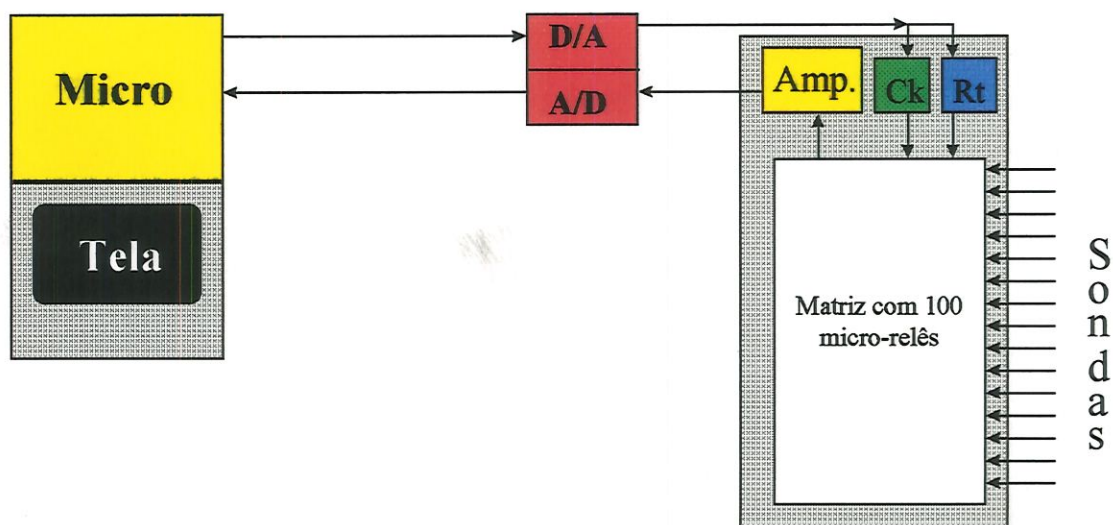
Estes termopares foram calibrados em banho Maria controlado por um termostato, a curva desta calibração é dada pela figura 12.



**Figura 12-** Curva de calibração dos termopares

A análise dos dados armazenados nos arquivos, permite a “visualização” do movimento da pluma térmica na lagoa, durante o regime transiente, e do padrão térmico da lagoa quando esta atinge o regime permanente.

Um diagrama de blocos da figura 13 mostra o controle do processo de medida.



**Figura 13** - Diagrama de blocos dos circuitos de controle e aquisição dos dados

Na qual:

A/D D/A é a placa de conversões analógico- digital e digital-analógico

Amp. é o amplificador de sinais

Ck é a entrada de clock para mudar o relê de entrada de sinais

Rt é a entrada de sinais de reset para posicionar o primeiro relê.

## 4.2. Despejo Térmico

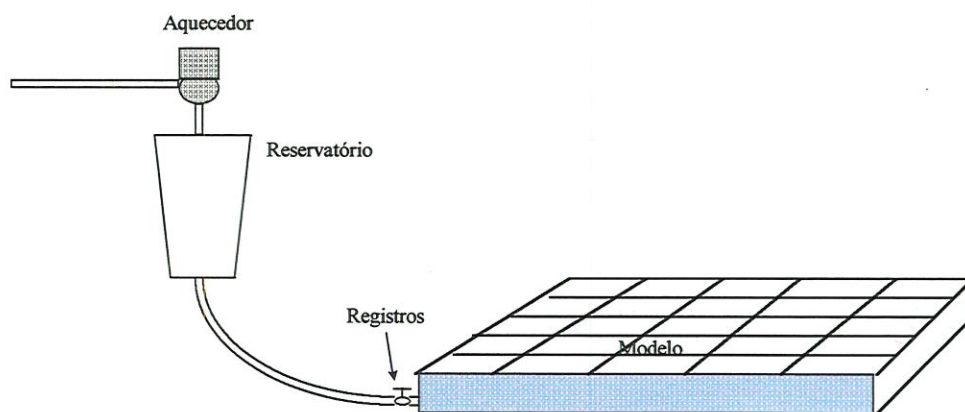
Para simular a entrada de uma lagoa de resfriamento foi montado um sistema de aquecimento de água antes da entrada do modelo.

O despejo de poluente térmico (água aquecida), foi planejado para utilizar um aquecedor de passagem com 4000 W de potência que alimenta um reservatório de 50 L, situado em nível mais elevado em relação ao nível do modelo.

Durante a descarga, o nível da água dentro do reservatório pode ser mantido constante, eliminando o excesso da vazão de alimentação através de um

vertedor (ladrão). O reservatório é utilizado nestas condições para manter a carga constante na entrada do modelo, compensando possíveis variações na rede hidráulica, que alimenta o aquecedor. A água aquecida do reservatório foi conduzida até a entrada do modelo por meio de tubulações com isolamento térmica.

O controle da vazão de entrada na lagoa foi realizado por um conjunto de registros, que foram calibrados para as vazões de estudo. Um esquema da montagem é ilustrada pela figura 14.



**Figura 14 - Sistema de despejo térmico do modelo.**

### 4.3. Estudo Térmico

Durante o despejo de “poluente térmico” na entrada do modelo o sistema de coleta é inicializado e passa a medir em todos os sensores, em intervalos de tempo determinado, com isto a cada instante são obtidos os campos de temperatura do modelo conhecendo-se sua evolução temporal.

Dos 100 pares termoeletricos, 84 são igualmente distribuídos pela área do modelo ( fig. 14), em posições que permitem avaliar o gradiente de temperaturas

ao longo do escoamento, desde a entrada do despejo, até a captação no outro extremo. Os demais termopares fornecem informações da temperatura despejo, temperatura de referência dos termopares e a temperatura em vários pontos da sala climatizada.

A malha de termopares instalados na lagoa, pode ser ajustada em diversos níveis de profundidade por meio de um ajuste de 4 parafusos que controla a altura da base que se apoia a malha de termopares. Deste modo permite uma visualização tridimensional do comportamento térmico do modelo.

A análise destas medida possibilita efetuar um estudo das características do comportamento térmico do modelo reduzido.

#### **4.3.1. Determinação do Regime Transiente e Permanente na Saída do Modelo**

Levantando uma curva das temperaturas, na saída do modelo pelo tempo pode-se determinar qual tempo o modelo em uma dada configuração e nível de vazão leva para passar do regime térmico transiente, onde a temperatura num dado ponto é função da posição e do tempo ou seja  $T = T(x,y,z,t)$ , até chamado regime térmico permanente onde a temperatura passa ser somente função da posição, ou seja  $T = T(x,y,z)$  [1,21].

#### **4.3.2. Tempo de Residência do Modelo**

O tempo de residência de um corpo d'água é o tempo que teoricamente a água leva para cruzar desde a entrada até a saída do corpo d'água

Um dos métodos para a estimativa deste tempo é a observação visual do deslocamento de um traçador colorido, que deve ser injetado na entrada do

modelo, em forma de pulso [22]. O acompanhamento do tempo desde a entrada até a saída fornece uma estimativa do tempo de residência. Um outro modo de estimar o tempo de residência da lagoa é medir o intervalo de tempo entre o despejo na entrada e a passagem do centróide de uma curva temperatura x tempo na saída.

#### **4.3.3. Dependência da Temperatura de Saída pela Vazão de Entrada**

A temperatura da água na saída de um processo de resfriamento mede o grau de eficiência do sistema. No caso das lagoas de resfriamento a temperatura de saída depende de vários fatores, um dos quais é ligado diretamente a quantidade de água utilizada no resfriamento.

Foi realizado um experimento para estabelecer a relação entre a vazão de entrada e a temperatura de saída no processo. Durante uma simulação do despejo, a medida que para uma dada vazão a temperatura de saída ficava constante (regime permanente), um novo valor de vazão era ajustado na entrada.

Deste modo obteve-se as temperaturas de saída para diferentes vazões de entrada para cada configuração em estudo.

#### **4.3.4. Dependência do Tempo de Residência pela Vazão de Entrada**

Uma outra característica de uma lagoa de resfriamento é que quanto maior o tempo de residência maior são as trocas de calor na interface ar-água e por consequência menor a temperatura na saída. Com os tempos de residência obtidos para cada vazão monta-se um gráfico que ilustra esta dependência. Teoricamente o tempo de residência é dado pela relação entre o volume da lagoa e a vazão de



entrada, mas esta relação não leva em conta de efeitos recirculação interna e zonas mortas, normalmente presentes.

#### **4.3.5. Perfil de Temperatura ao Longo da Profundidade**

Um dos fatores que caracterizam uma lagoa de resfriamento é o seu perfil térmico ao longo da profundidade [11]. Para determinar o perfil térmico do modelo foi montado um dispositivo manual que movimentava toda a malha de termopares em diferentes profundidades. Desta maneira foram realizadas medidas em intervalos de 2mm desde o fundo até a superfície da mesma.

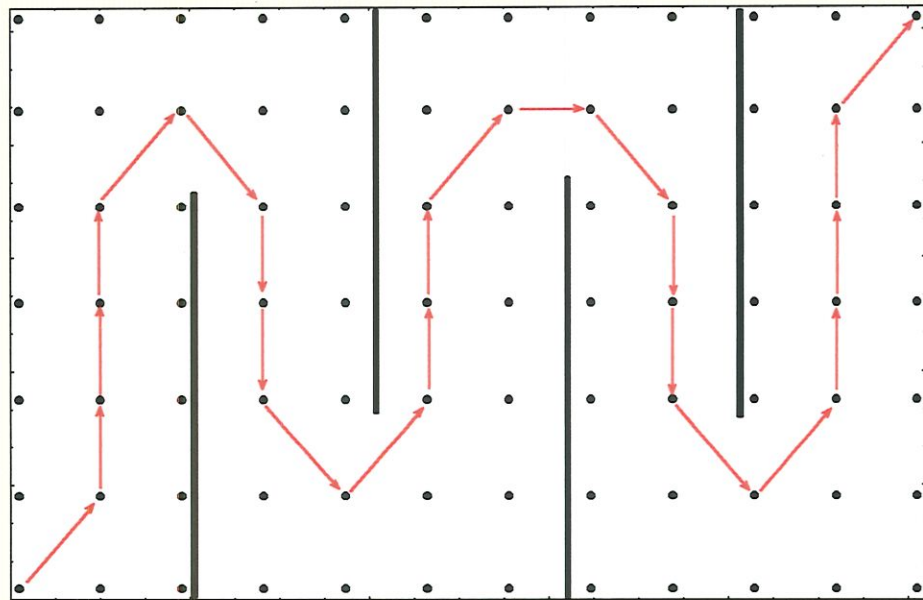
Isto foi feito apenas no regime permanente uma vez que não seria possível fazer coletas em todas as profundidades num mesmo instante, pois após a coleta de um nível os termopares tinham que ser movimentados para outra profundidade.

#### **4.3.6. Temperatura da Água ao Longo do Escoamento Longitudinal**

A temperatura da água na lagoa de resfriamento vai diminuindo a medida que o escoamento segue seu caminho em direção a saída. Para verificar como se comporta esta queda de temperatura com a posição, foi inicialmente realizada a escolha dos termopares que estavam posicionados ao longo do escoamento principal.

A escolha foi realizada pelo acompanhamento de uma mancha colorida provocada pela injeção de um traçador (rodamina WT), na entrada do modelo. A medida que a mancha foi avançando, foram marcados os pontos ao longo do



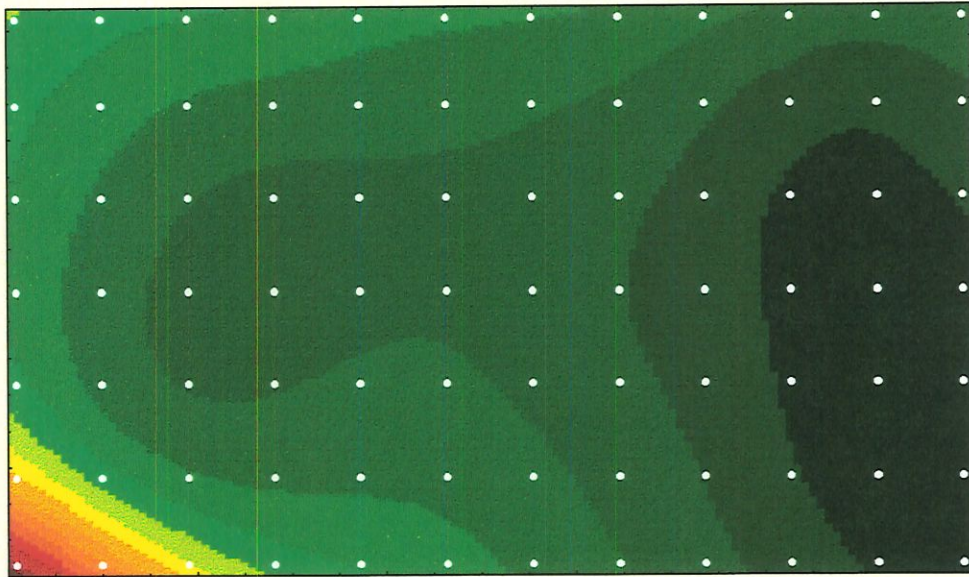


**Figura 16-** Pontos ao longo do escoamento na configuração S

#### 4.3.7. Isotermas de Temperatura

Com o mesmo princípio usado para medir o perfil de temperatura pode-se organizar as medida de cada profundidade com a coordenada que ocupa num plano horizontal (coordenadas  $X,Y$ ), do escoamento. Com isto a cada altura (coordenada  $Z$ ) do modelo é possível interpolar uma matriz de pontos  $(x,y,T)$ , para obter uma superfície isotérmica [23].

A figura 17 ilustra os pontos de medidas da temperatura e a interpolação destes pontos gerando uma superfície isotérmica.



**Figura 17** - Pontos de medidas em uma dada profundidade e a interpolação correspondente das medidas realizadas.

#### **4.4. Estudo Dinâmico Através de Técnica de Visualização**

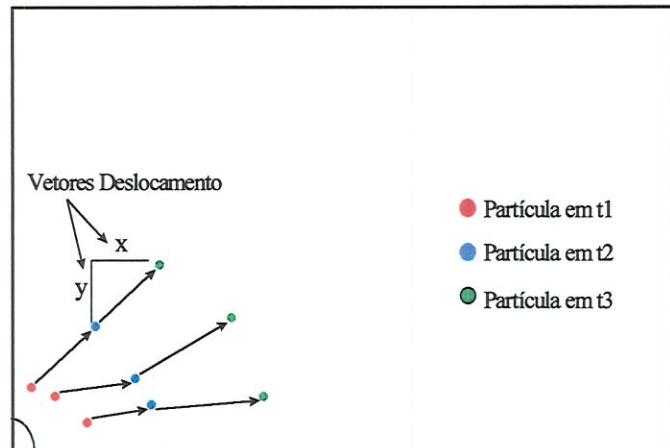
Um estudo fluido-dinâmico foi realizado por meio de observações visuais e a partir da análise de filmagens de partículas na superfície e de traçador junto ao fundo. O campo de escoamento do fundo do modelo, foi obtido pela análise do deslocamento de uma mancha originada a partir da dissolução de permanganato de potássio, colocado junto ao fundo da lagoa.

#### 4.4.1. Campo de Escoamento Superficial

O campo de escoamento na superfície da água foi realizado pela análise do movimento de partículas flutuantes.

Filmou-se o movimento de partículas na superfície e por meio de uma placa de digitalização marca Vídeo Blaster, digitalizou-se as imagens quadro a quadro.

Com um programa de computador montado em linguagem Visual Basic, marcou-se a posição das partículas num primeiro quadro e num quadro subsequente, determinando a direção percorrida pela partícula e, por consequência, pelo escoamento. A figura 18 ilustra o método usado.



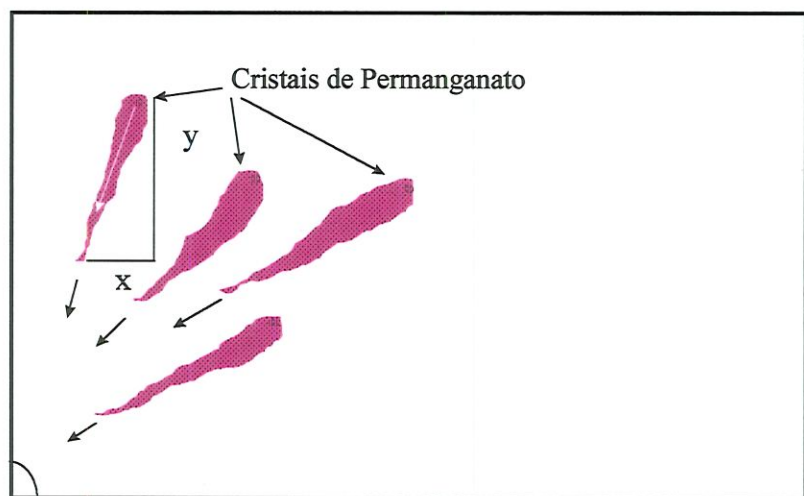
**Figura 18-** Ilustração do método usado para calcular o escoamento superficial

#### 4.4.2 Campo de Escoamento Próximo ao Fundo do Modelo

Por processo similar ao descrito acima pode-se determinar o campo de escoamento no fundo da lagoa, utilizando-se de pequenos cristais de permanganato de potássio.

O permanganato ao dissolver-se na água, formou uma mancha colorida, que é arrastada na direção do escoamento próximo ao fundo.

Digitalizando a imagem quadro a quadro e usando o programa do item anterior, foi marcada a posição inicial do cristal e a posição da frente da mancha, determinando o deslocamento do escoamento. A ifigura 19 mostra o método para determinação do escoamento de fundo.



**Figura 19** - Ilustração do método para medir o escoamento de fundo no modelo

#### **4.5. Análise da Perda de Calor Superficial**

A perda de calor na área da lagoa se dá de modo não uniforme, pois depende da temperatura da superfície. Esta perda é calculada levando-se em conta os conceitos de temperatura de equilíbrio e do coeficiente superficial de trocas de calor.

#### **4.6. Cálculo do Adimensional de pond para os Experimentos**

Para cada simulação foi analisado o número de pond e a classificação na qual se enquadra cada configuração, segundo o critério do adimensional.

## 5. RESULTADOS E DISCUSÃO

Foram estudados três tipos de configurações com três vazões distintas (baixa, média e alta). A tabela abaixo indica as vazões em cada experimento.

**Tabela 2 - Tipo de configuração e vazões utilizadas**

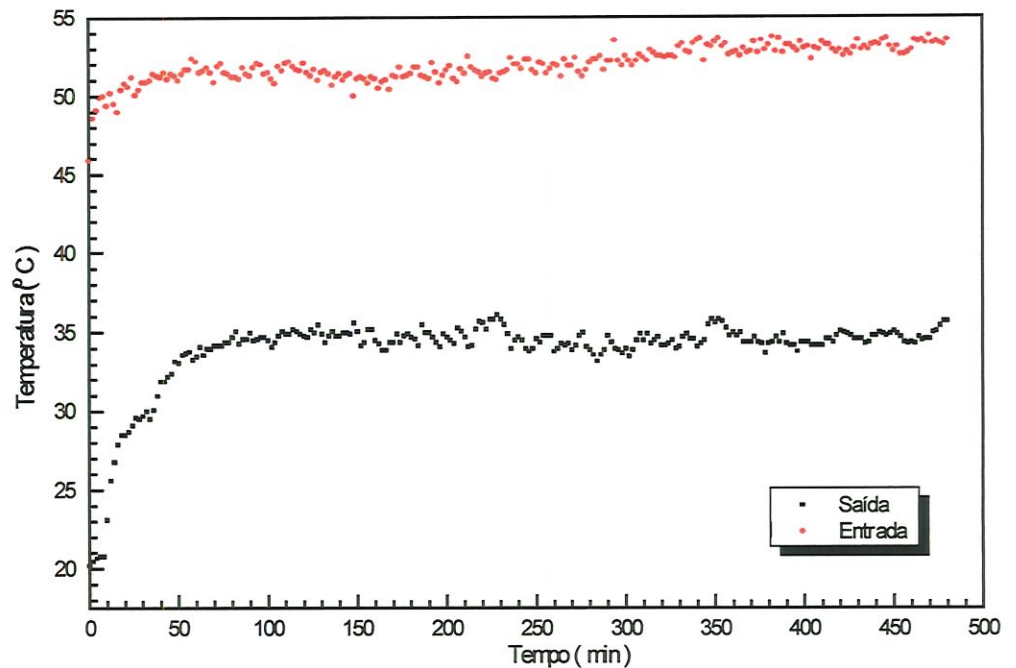
| Configuração | Vazão ( L/min ) |
|--------------|-----------------|
| Tipo Livre   | Baixa = 0,89    |
|              | Média = 1,29    |
|              | Alta = 2,09     |
| Tipo S       | Baixa = 0,88    |
|              | Média = 1,20    |
|              | Alta = 2,22     |
| Tipo U       | Baixa = 0,90    |
|              | Média = 1,28    |
|              | Alta = 2,20     |

### 5.1. Comportamento Transiente e Permanente da Temperatura na Saída do Modelo

Nesta análise as medidas foram coletadas pelo equipamento com os termopares posicionados em uma profundidade de 10 mm. Estes dados de temperatura em função do tempo, foram utilizados para o levantamento das curvas da temperatura de saída do modelo. Isto foi realizado para cada configuração nas diferentes vazões de estudo.

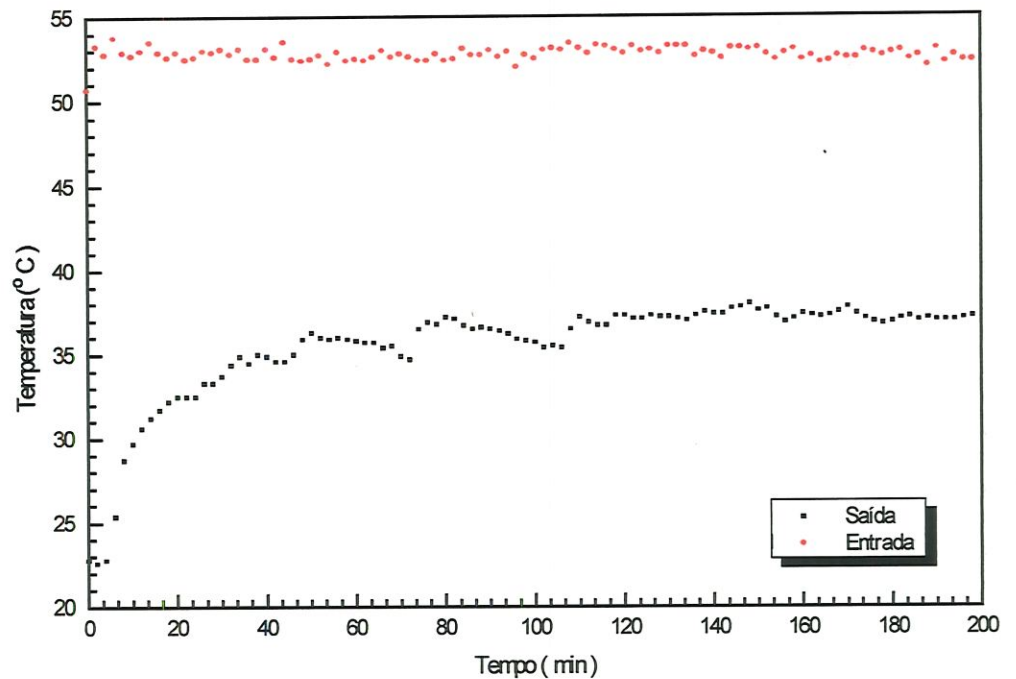


Na seqüência são apresentados os gráficos obtidos nos experimentos com vazões baixa, média e alta para a Configuração de Escoamento Livre.



**Figura 20** - Temperatura de saída com configuração livre em condições de vazão baixa

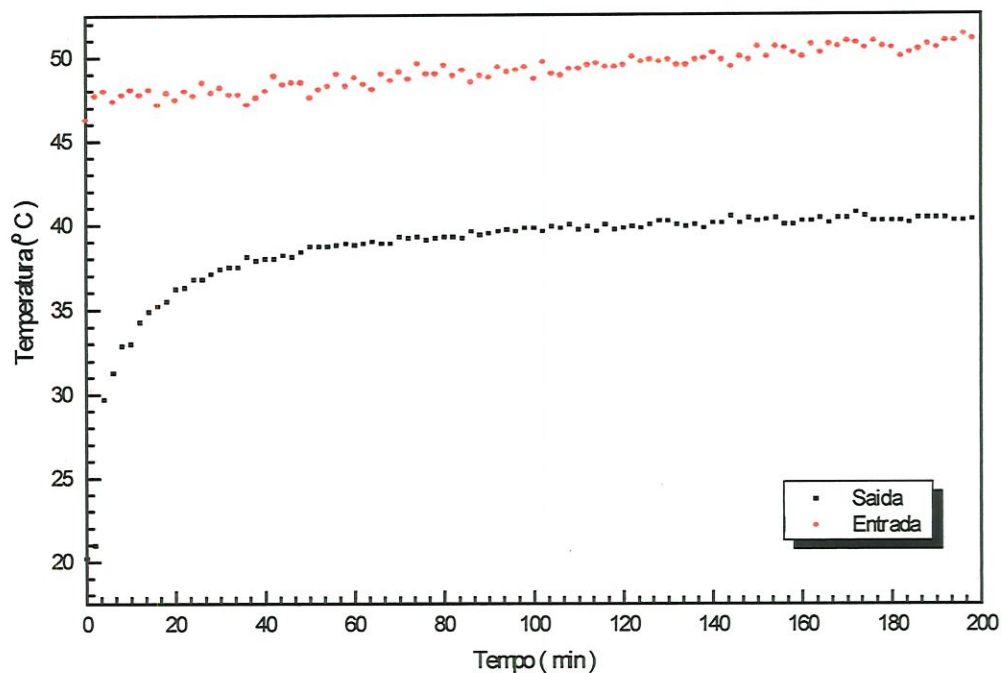
Para esta vazão a temperatura de entrada foi aproximadamente 52,0°C. Na curva da temperatura de saída observa-se que o tempo para se estabelecer o regime permanente é de aproximadamente 80 minutos, após o qual a temperatura se mantém por volta de 34,5°C.



**Figura 21** - Temperatura de saída com configuração livre em condições de vazão média.

Para a vazão média a temperatura de entrada foi por volta de 52,5°C. O tempo consumido para se estabelecer o regime permanente foi de aproximadamente 95 minutos, após o qual a temperatura na saída se manteve em 37,2°C.

Na vazão média, assim como na vazão baixa, observam-se oscilações na temperatura de saída, que são resultados da influência de recirculações que possuem intensidade suficiente para perturbar o caminho preferencial do escoamento, misturando água de diferentes temperaturas.

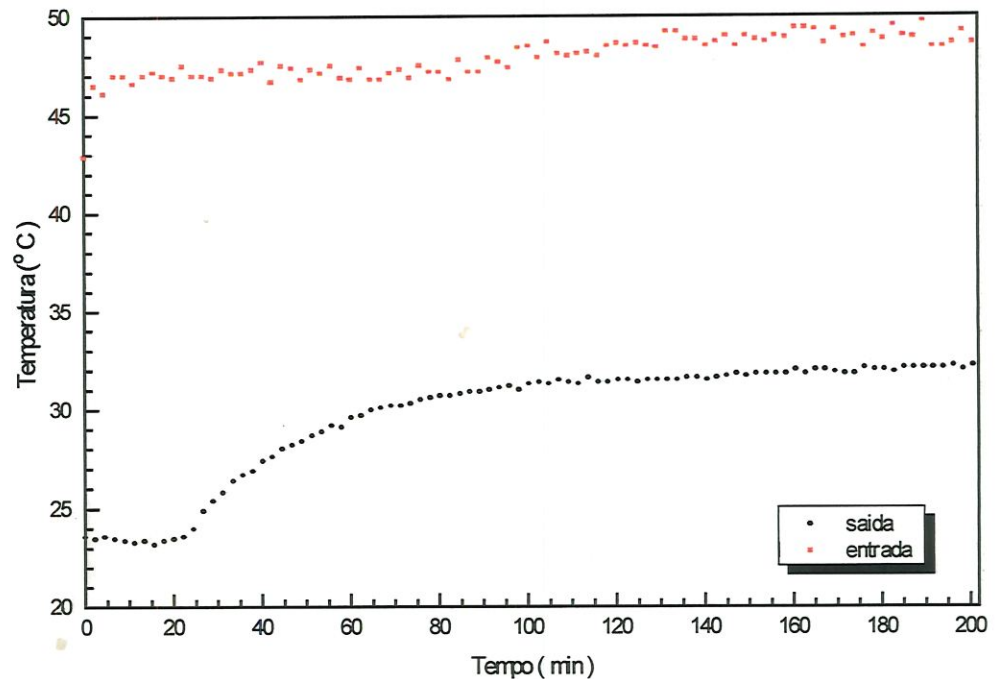


**Figura 22** - Temperatura de saída com configuração livre em condições de vazão alta.

Para a vazão alta a temperatura de entrada foi mantida ao redor de  $49,0^{\circ}\text{C}$ . O tempo para se estabelecer o regime permanente foi de aproximadamente 128 minutos, após o qual a temperatura de saída se manteve em  $40,5^{\circ}\text{C}$ .

Na vazão alta observa-se uma menor oscilação na temperatura de saída, porque a influência das recirculações não perturbam de modo significativo o escoamento principal.

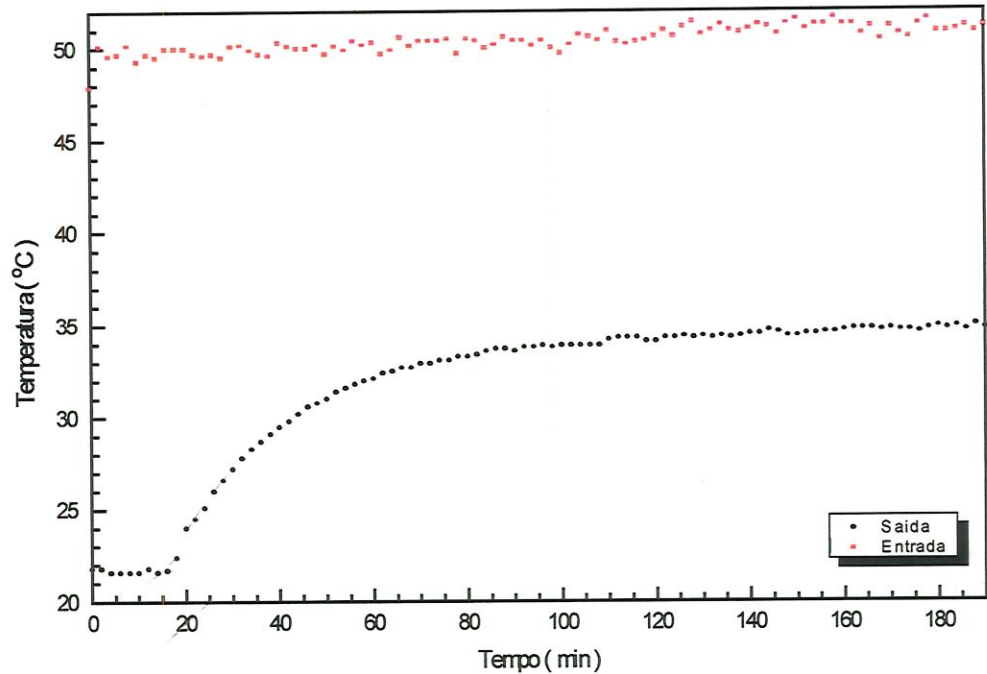
Na seqüência são apresentados os gráficos obtidos para a Configuração de Escoamento Tipo S com vazões baixa, média e alta respectivamente.



**Figura 23** - Temperatura de saída com configuração S em condições de vazão baixa.

Para a vazão baixa a temperatura de entrada foi em torno de 48°C e o tempo para se estabelecer o regime permanente foi de aproximadamente 164 minutos, após o qual a temperatura na saída se manteve em 32,0°C.

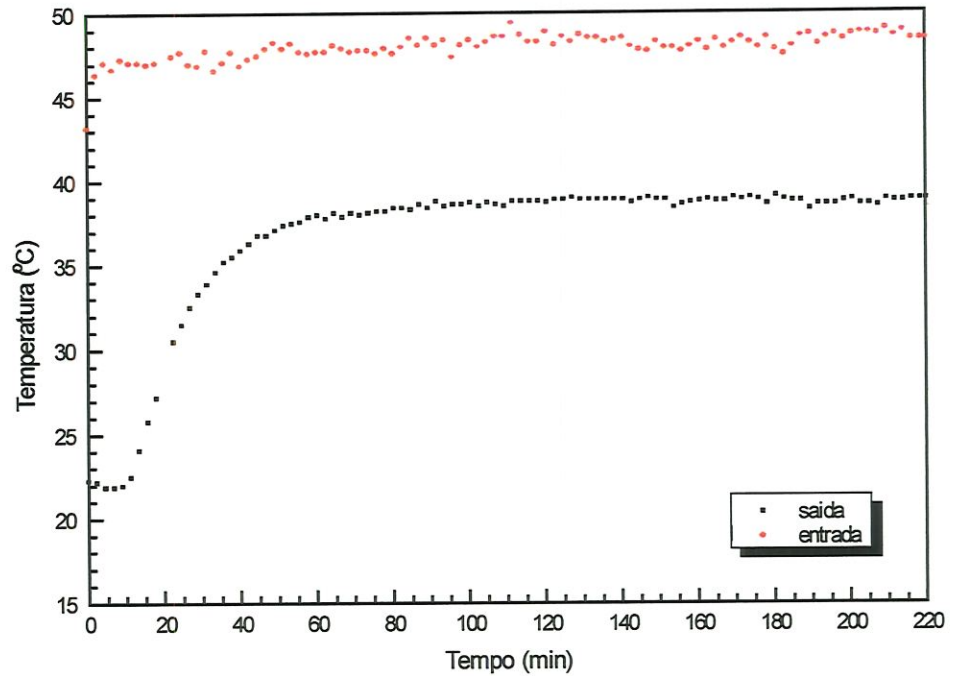
O tempo de residência nos experimentos onde existe as chicanas começa a ser maior que no escoamento livre pelo fato de aumentar o caminho do escoamento.



**Figura 24** - Temperatura de saída com configuração S em condições de vazão média.

Para a vazão média a temperatura de entrada ficou por volta dos 50°C e o tempo para se estabelecer o regime permanente foi de aproximadamente 160 minutos, após o qual a temperatura na saída se manteve em 34,8°C.

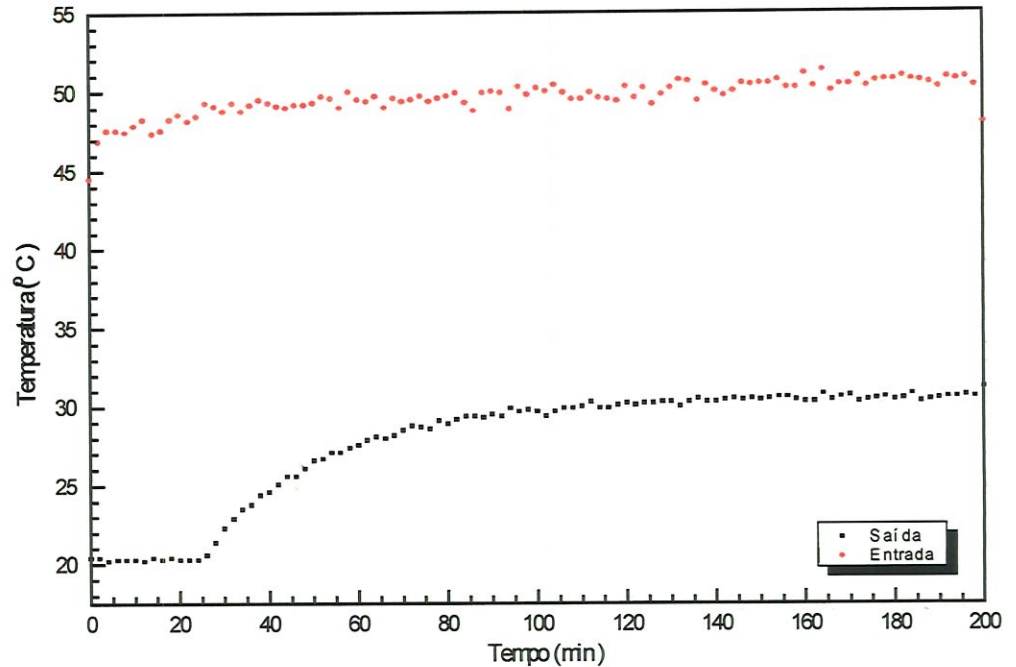
Para esta configuração as recirculações são menores e as oscilações de saída são menos intensas que na configuração livre, pois existe um caminho bem definido para o escoamento.



**Figura 25** - Temperatura de saída com configuração S em condições de vazão alta.

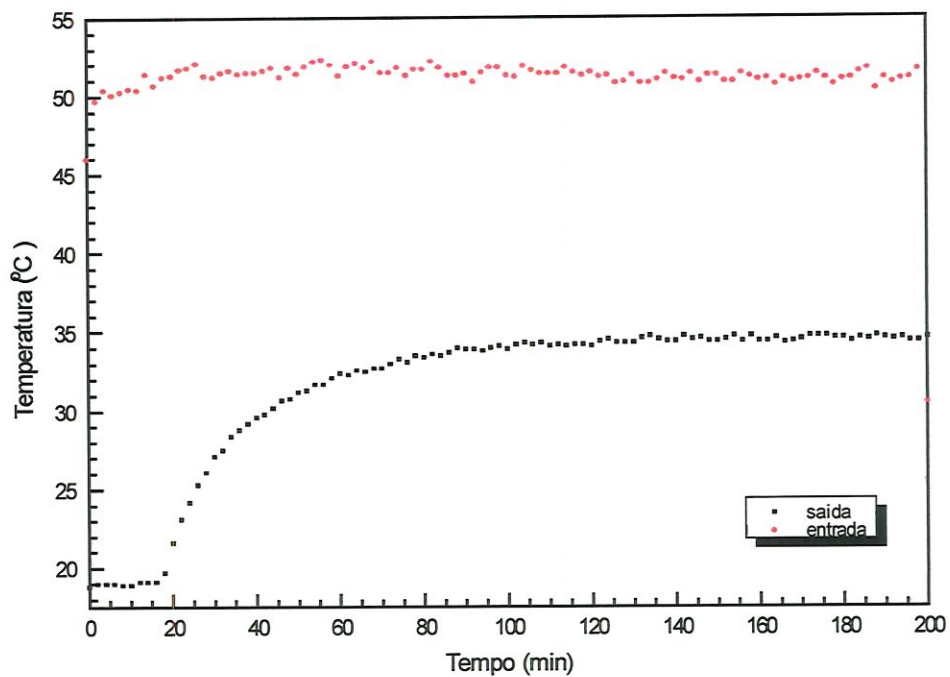
Para a vazão alta a temperatura de entrada foi de aproximadamente 48°C e o tempo para se estabelecer o regime permanente foi de 110 minutos, após o qual a temperatura na saída se manteve em 38,9°C.

Na seqüência são apresentados os gráficos obtidos para a Configuração de Escoamento Tipo U com vazões baixa, média e alta respectivamente.



**Figura 26** - Temperatura de saída com configuração U em condições de vazão baixa.

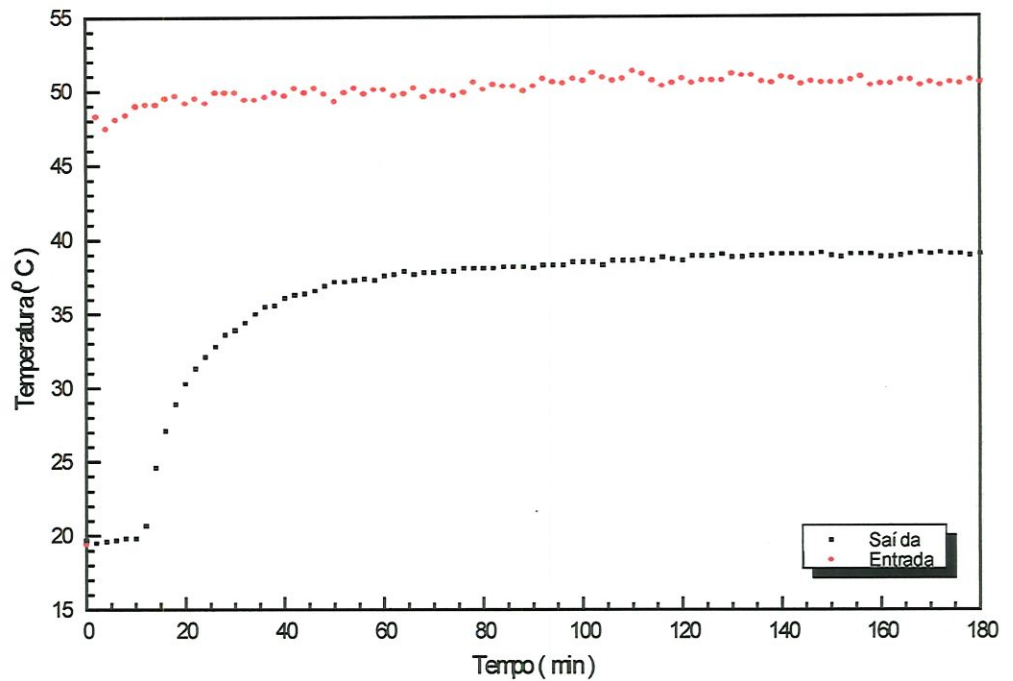
Para a vazão baixa a temperatura de entrada foi em torno de 50°C e o tempo para se estabelecer o regime permanente foi de aproximadamente 137 minutos, após o qual a temperatura de saída se manteve constante em 35,6°C.



**Figura 27** - Temperatura de saída com configuração U em condições de vazão média.

Para a vazão média a temperatura de entrada foi próxima a 51°C com um tempo para se estabelecer o regime permanente de aproximadamente 132 minutos, após o qual a temperatura se manteve constante em 34,5°C.





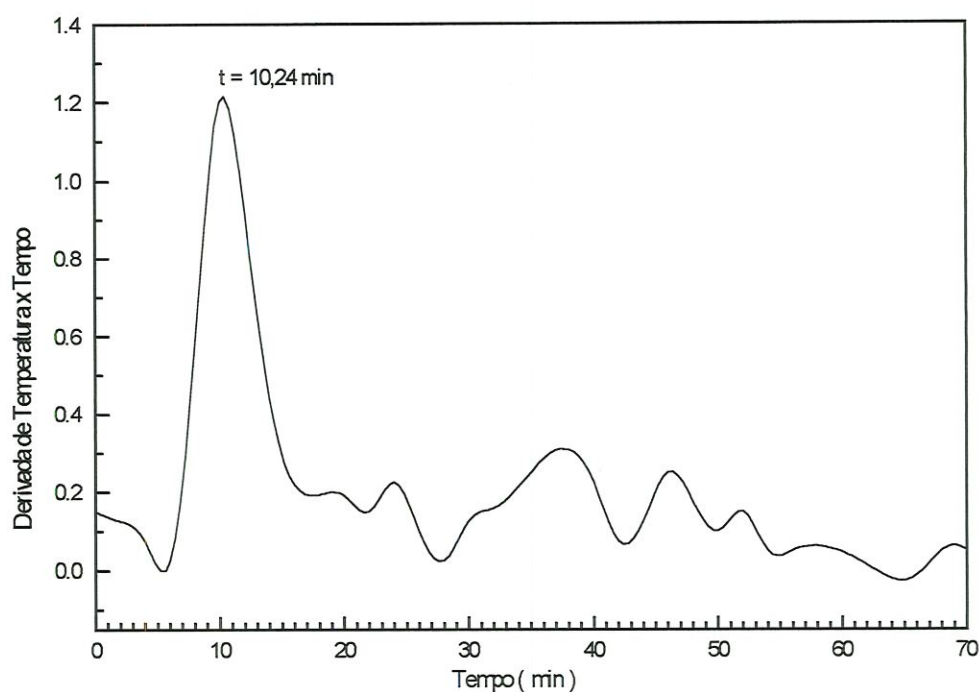
**Figura 28** - Temperatura de saída com configuração U em condições de vazão alta.

Para a vazão alta a temperatura de entrada foi de 51,0°C e o tempo para se estabelecer o regime permanente foi de aproximadamente 122 minutos, após o qual a temperatura se manteve constante em 39,0°C.

Pelas mesmas razões que na configuração S não ocorrem oscilações na temperatura de saída.

## 5.2. Tempo de Residência do Modelo

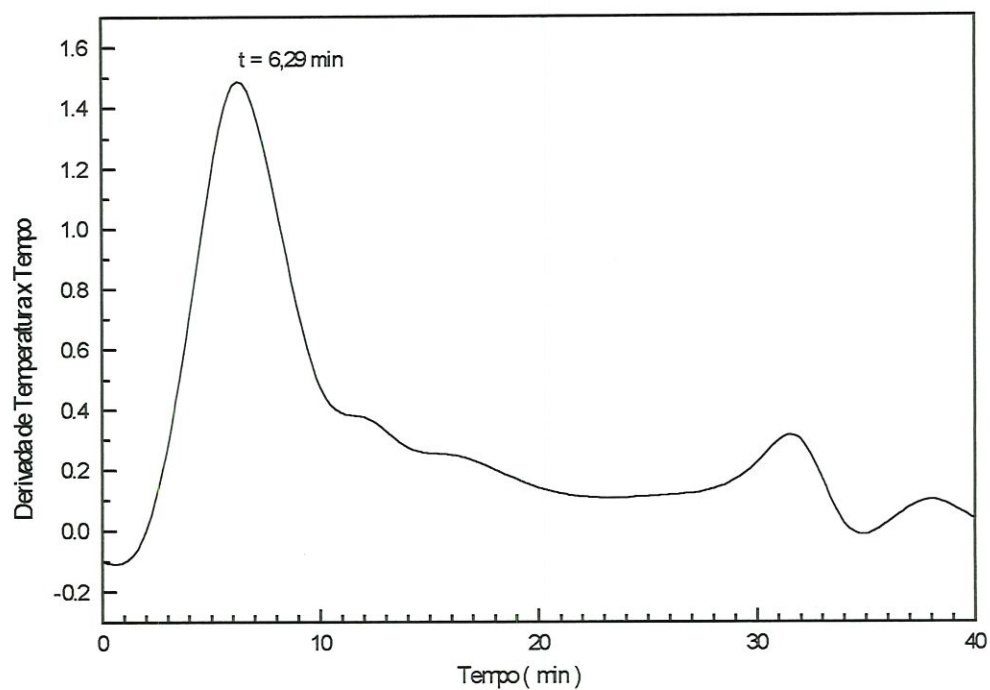
O tempo de residência do modelo foi analisado pelo instante de ocorrência do pico da derivada dos gráficos do item 5.1 e do tempo de chegada de uma pluma colorida injetada junto com a água quente na entrada.



**Figura 29** - Determinação do tempo de residência no escoamento livre em condições de vazão baixa.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 10,24 minutos.

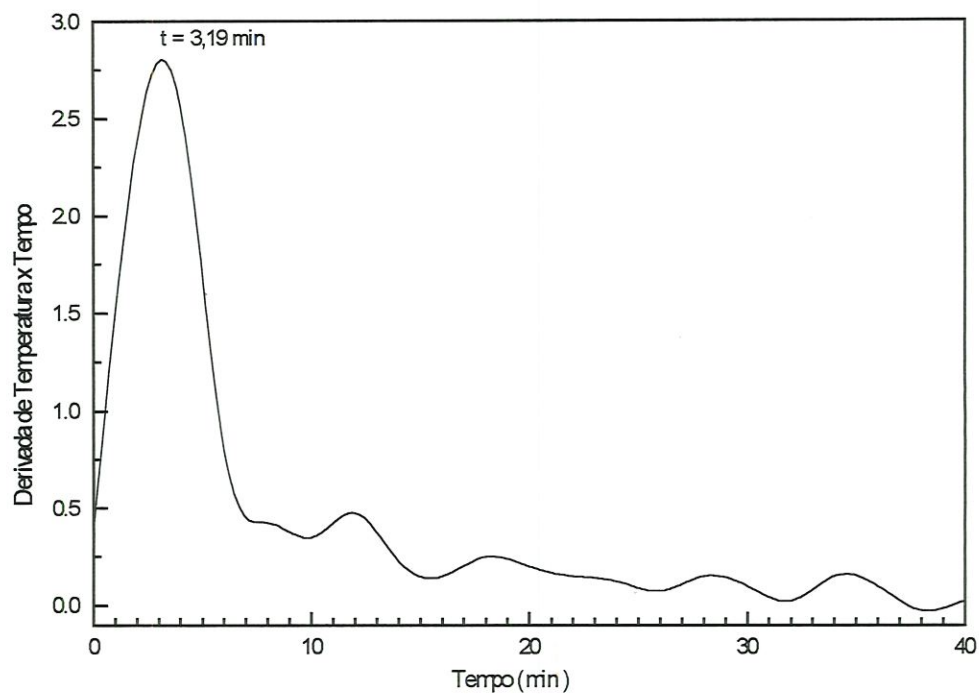
No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 11,43 minutos.



**Figura 30** - Determinação do tempo de residência no escoamento livre em condições de vazão média.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 6,29 minutos.

No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 6,97 minutos.



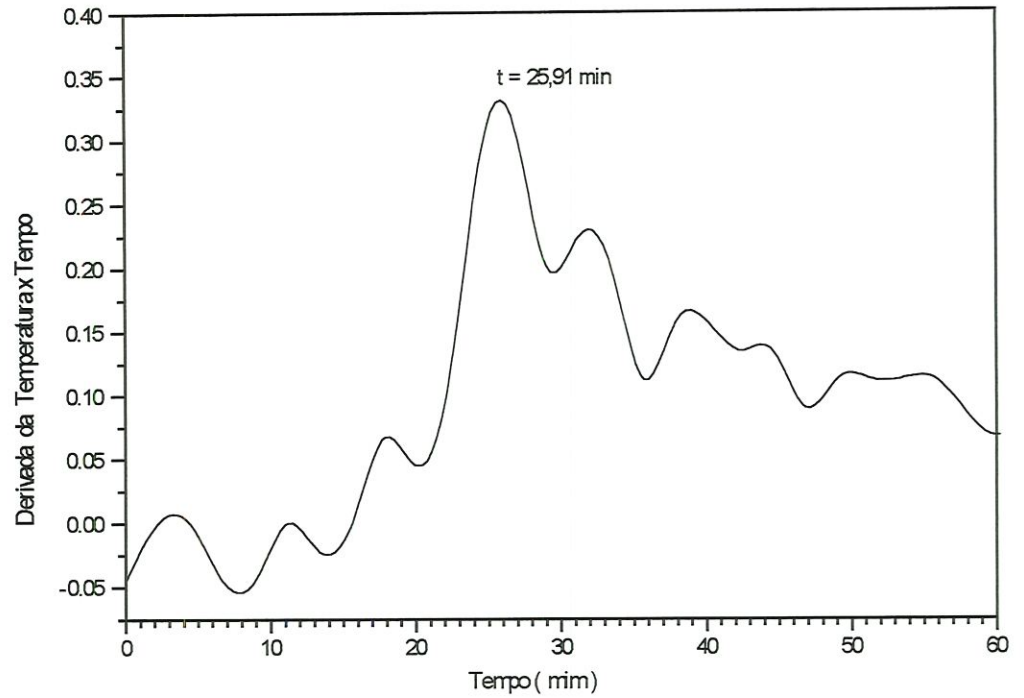
**Figura 31** - Determinação do tempo de residência no escoamento livre em condições de vazão alta.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 3,19 minutos.

No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 4,03 minutos.

**Tabela 3** - Vazão pelo tempo de residência para configuração livre

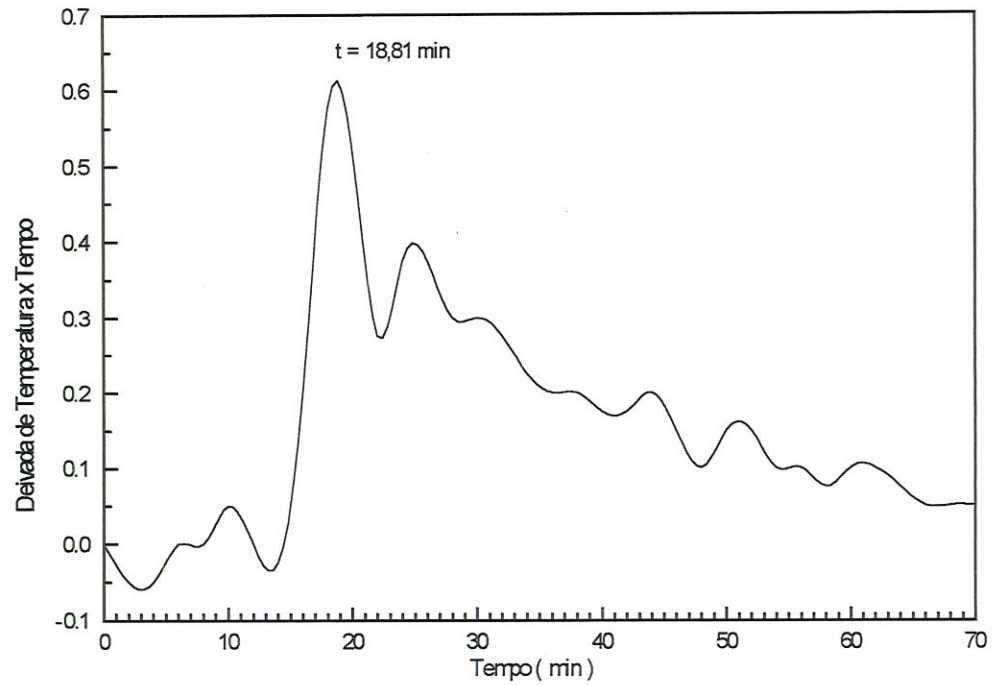
| Vazão (l/min) | Temp. Resid.(min) |
|---------------|-------------------|
| 0,89          | 10,24             |
| 1,29          | 6,29              |
| 2,09          | 3,19              |



**Figura 32** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão baixa.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 25,91 minutos.

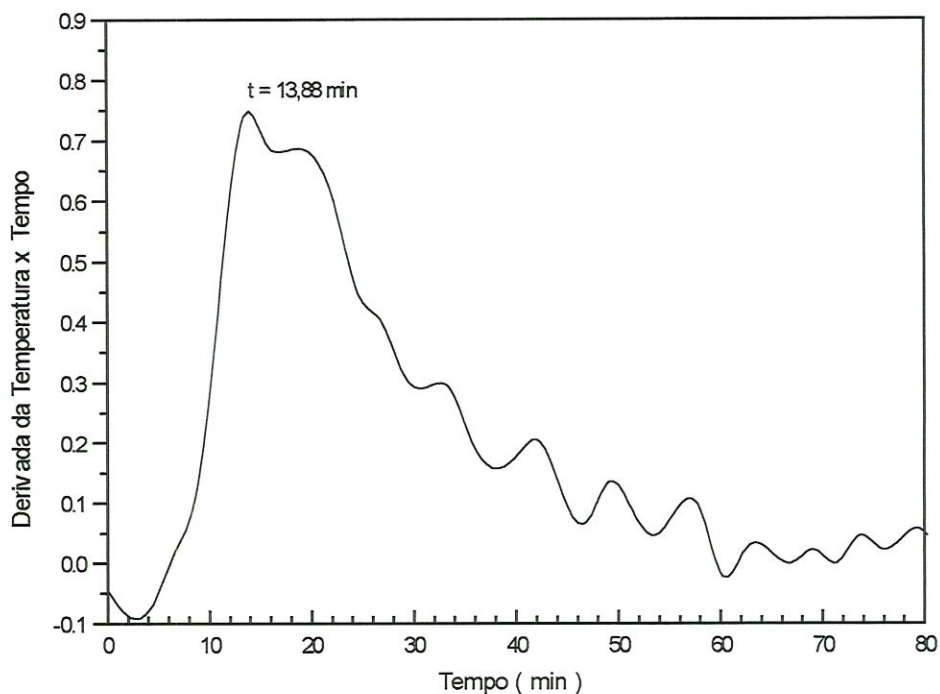
No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 28,09 minutos.



**Figura 33** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão média.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi 18,81 minutos.

No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 20,13 minutos.



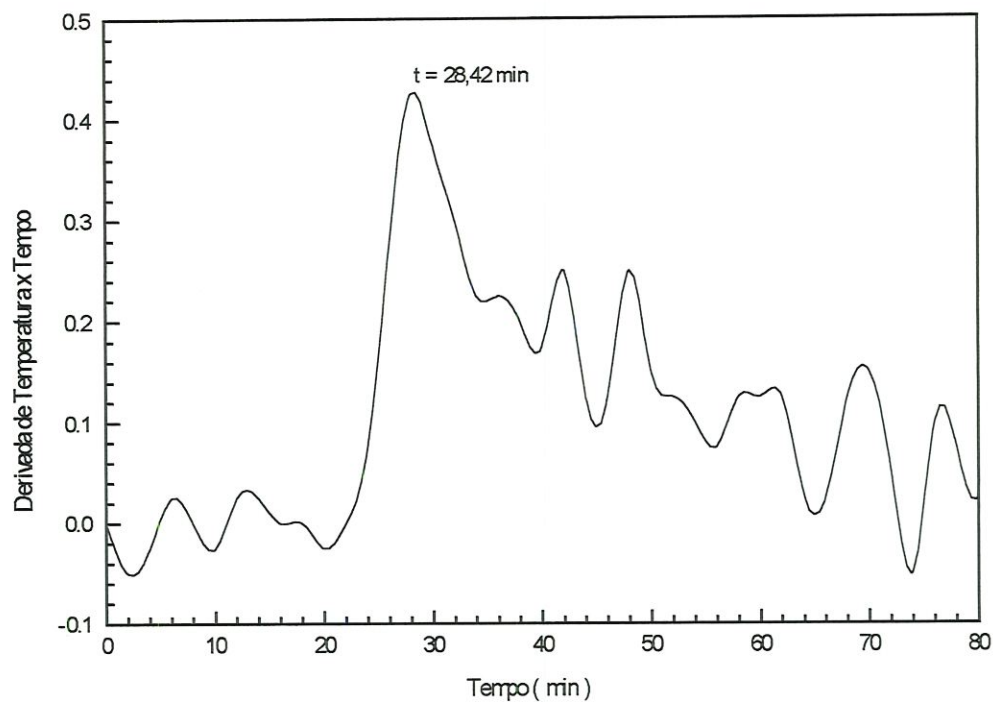
**Figura 34** - Determinação do tempo de residência na configuração S em condições de vazão alta.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 13,88 minutos.

No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 14,98 minutos.

**Tabela 4** - Vazão pelo tempo de residência para configuração S

| Vazão (l/min) | Temp. Resid.(min) |
|---------------|-------------------|
| 0,88          | 25,91             |
| 1,20          | 18,81             |
| 2,22          | 13,88             |

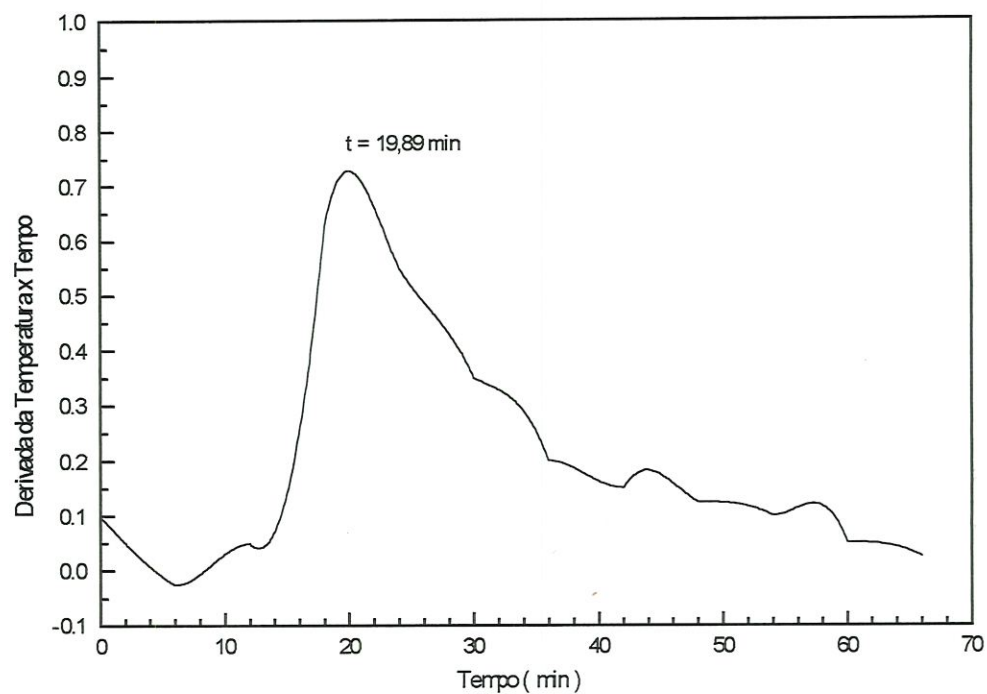


**Figura 35** - Determinação do tempo de residência na configuração U em condições de vazão baixa.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 28,43 minutos.

No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 30,67 minutos.

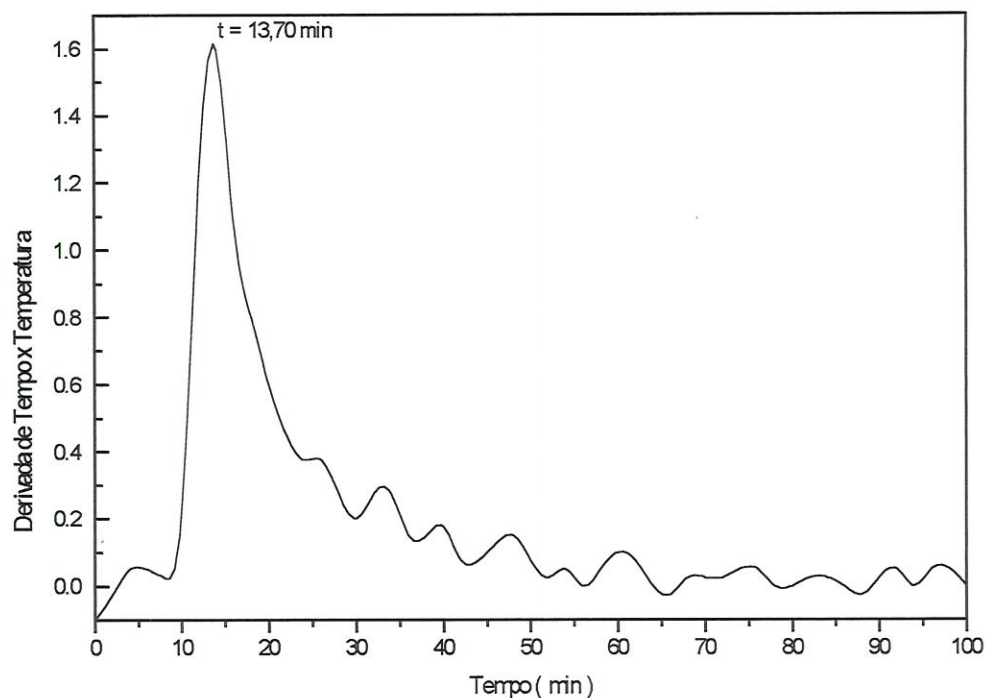




**Figura 36** - Determinação do tempo de residência na configuração U em condições de vazão média.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 19,89 minutos.

No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 20,77 minutos.



**Figura 37** - Determinação do tempo de residência na configuração U em condições de vazão alta.

Do gráfico observa-se que o tempo de residência foi de 13,70 minutos.

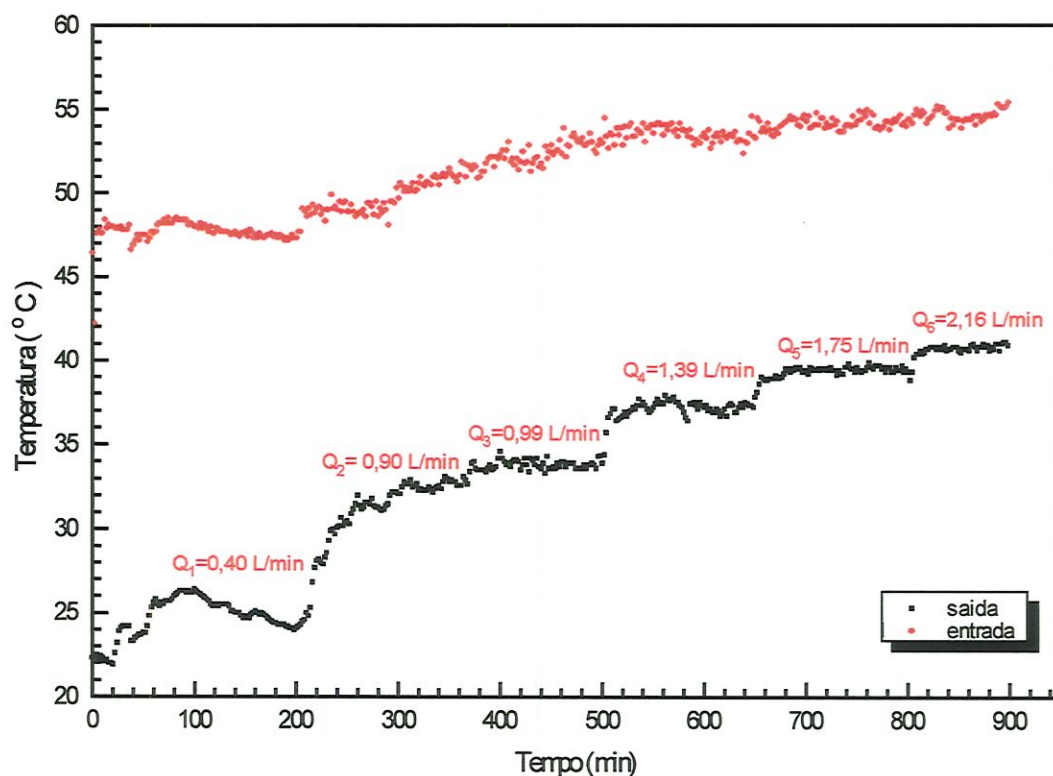
No método de observação da pluma colorida o tempo de chegada foi de 14,80 minutos.

**Tabela 5** - Vazão pelo tempo de residência para configuração U

| Vazão (l/min) | Temp. Resid.(min) |
|---------------|-------------------|
| 0,90          | 28,42             |
| 1,28          | 19,89             |
| 2,20          | 13,70             |

### 5.3. Dependência da Temperatura de Saída do Modelo pela Vazão de Entrada

Com o aumento da vazão tem-se o decréscimo do tempo de residência, diminuindo a troca de calor entre a água e o ar, resultando em uma temperatura de saída mais elevada. Na seqüência é apresentado um gráfico (Figura 37), onde a vazão de entrada é variada de modo a obter a temperatura de saída para cada nível de vazão.



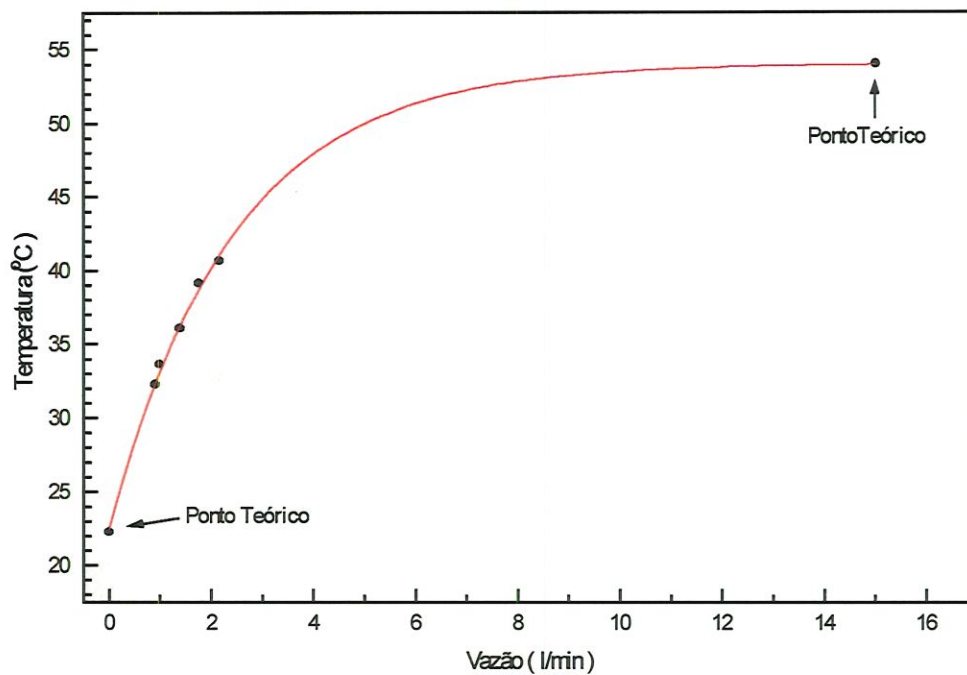
**Figura 38** - Temperatura de saída para diferentes vazões de entrada em escoamento livre.

Analisando o gráfico obteve-se a Tabela 6 da vazão de entrada com a respectiva temperatura de saída do modelo

**Tabela 6** - Vazão de entrada pela temperatura de saída em configuração livre

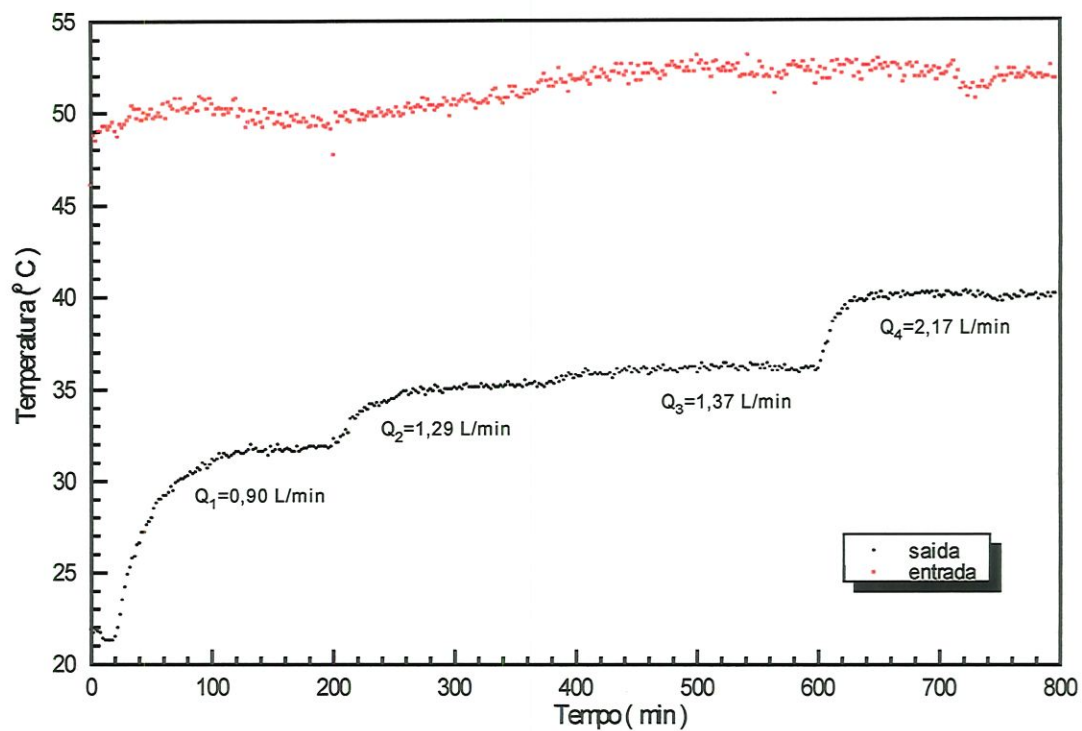
| Vazão ( l/min ) | Temp. Saída ( °C ) |
|-----------------|--------------------|
| 0,90            | 32,3               |
| 0,99            | 33,7               |
| 1,39            | 36,1               |
| 1,74            | 39,2               |
| 2,16            | 40,7               |

A partir destes valores foi construído um gráfico que mostra a dependência da temperatura de saída do modelo em função da vazão de entrada.



**Figura 39-** Dependência da temperatura de saída pela vazão de entrada em escoamento livre

Os pontos teóricos foram tomados considerando: no caso de vazão nula a temperatura do modelo é a temperatura inicial da água antes do despejo, já no caso de uma vazão bastante alta (baixíssimo tempo de residência), a água não troca calor com a atmosfera permanecendo com a temperatura do despejo.



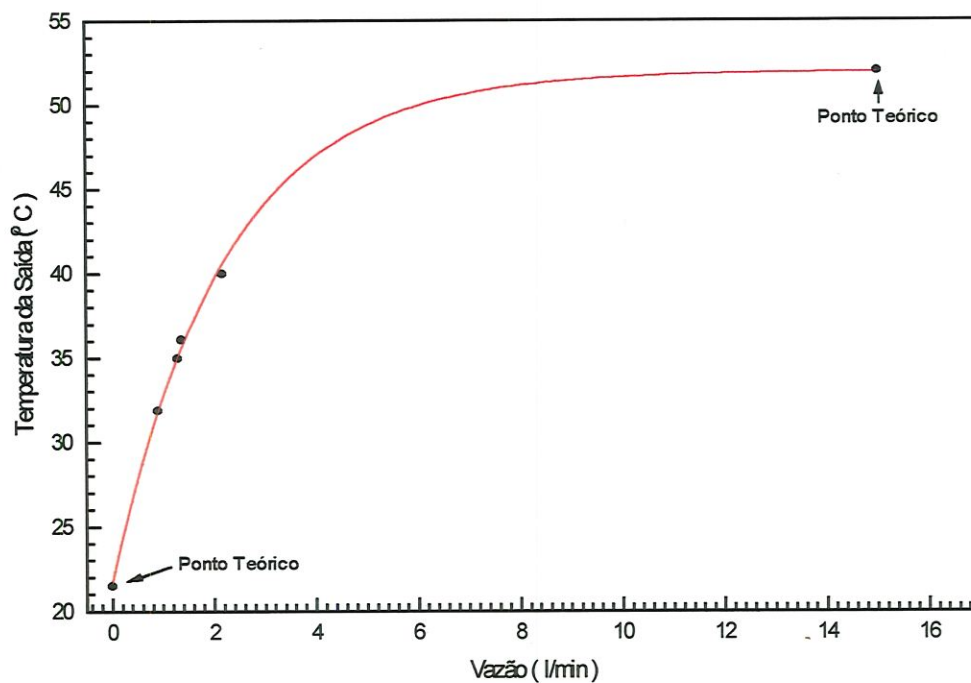
**Figura 40** - Temperatura de saída para diferentes vazões de entrada em configuração S.

Pela análise do gráfico foi montada a Tabela 7 da temperatura de saída pela vazão de entrada.

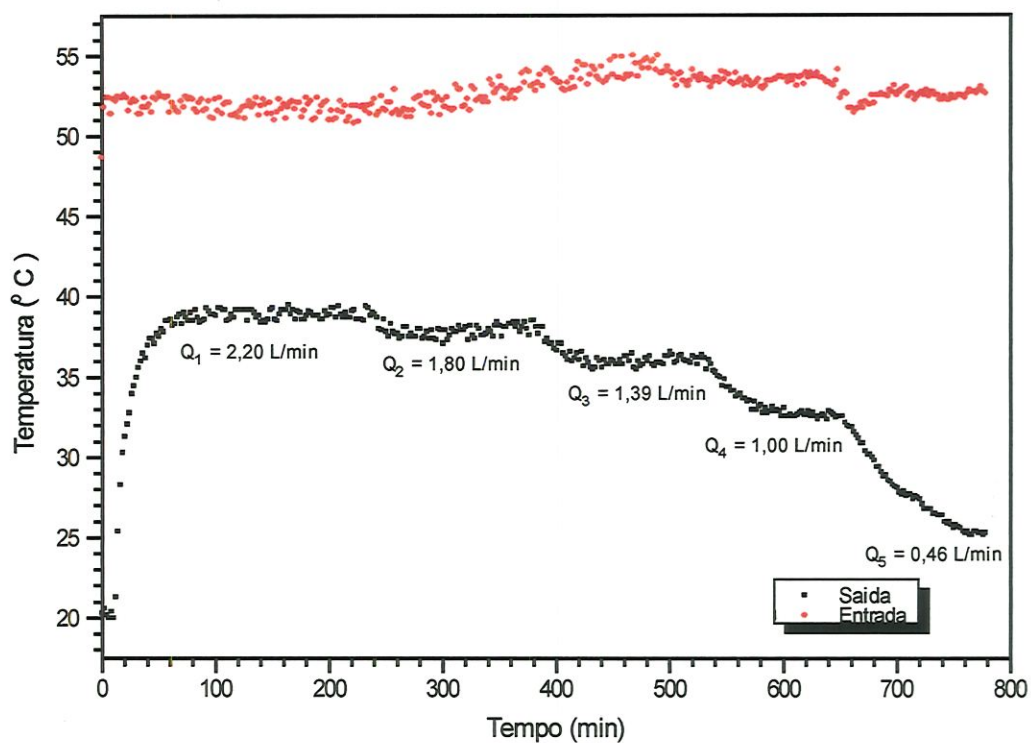
**Tabela 7** - Vazão de entrada na configuração S pela temperatura de saída

| Vazão ( l/min ) | Temp. Saída (°C) |
|-----------------|------------------|
| 0,90            | 32,3             |
| 0,99            | 33,7             |
| 1,39            | 36,1             |
| 1,74            | 39,2             |

Com os valores da tabela 7 obtém-se a curva que apresenta a dependência da vazão de entrada com a temperatura de saída para a configuração S



**Figura 41** - Dependência da temperatura de saída pela vazão de entrada em Configuração S.



**Figura 42** - Temperatura de saída para diferentes vazões de entrada em configuração U

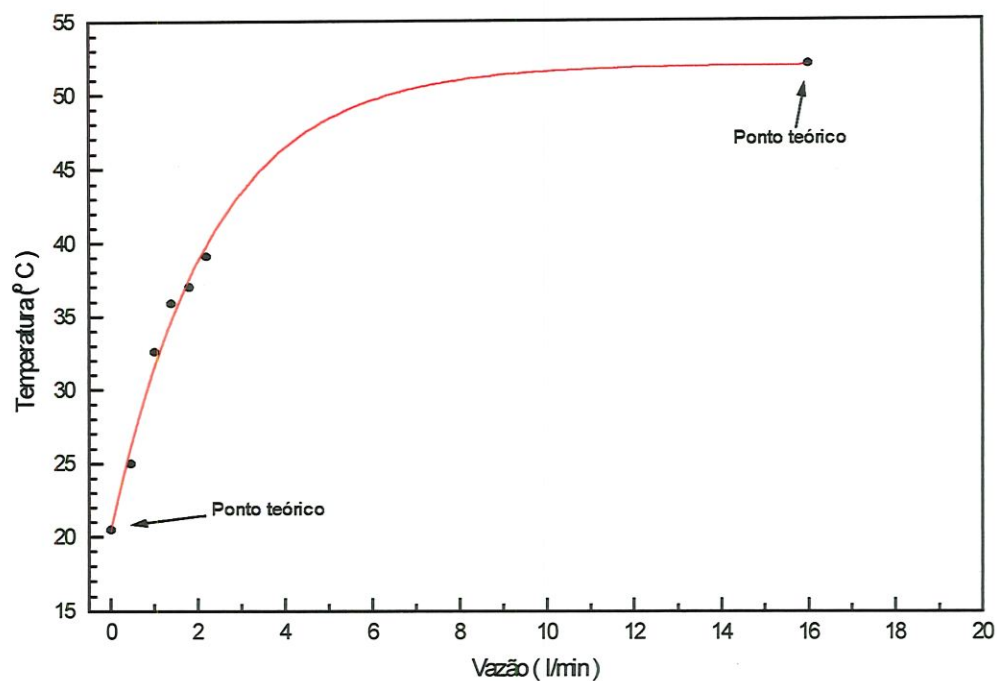
Do gráfico obteve-se a Tabela 8

**Tabela 8** - Vazão de entrada na configuração U pela temperatura de saída

| Vazão ( l/min ) | Temp. Saída ( °C ) |
|-----------------|--------------------|
| 0,46            | 25,0               |
| 1,00            | 32,8               |
| 1,39            | 35,9               |
| 1,81            | 37,0               |
| 2,20            | 39,1               |



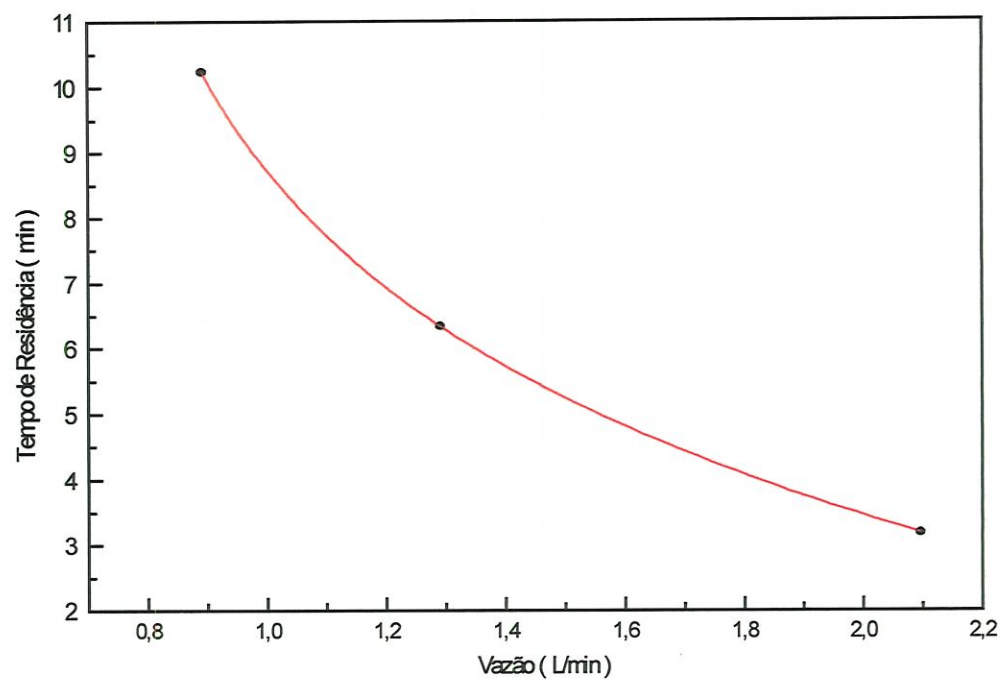
Com os dados da Tabela 8 foi montado o gráfico da figura 43.



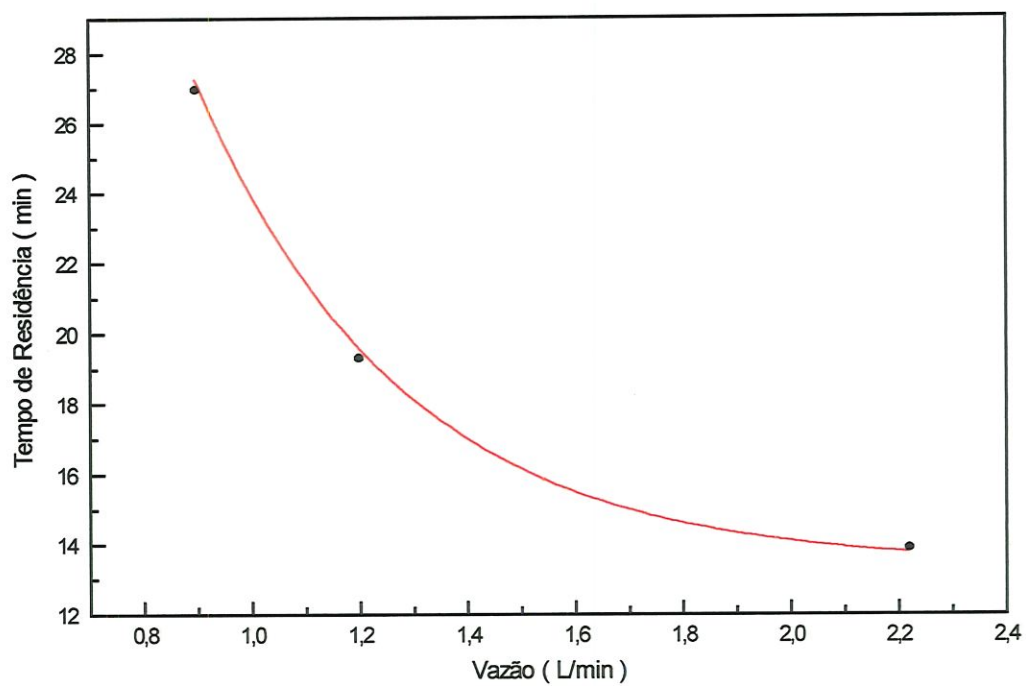
**Figura 43** - Dependência da temperatura de saída pela vazão de entrada em configuração U

#### 5.4. Dependência do Tempo de Residência com a Vazão de Entrada

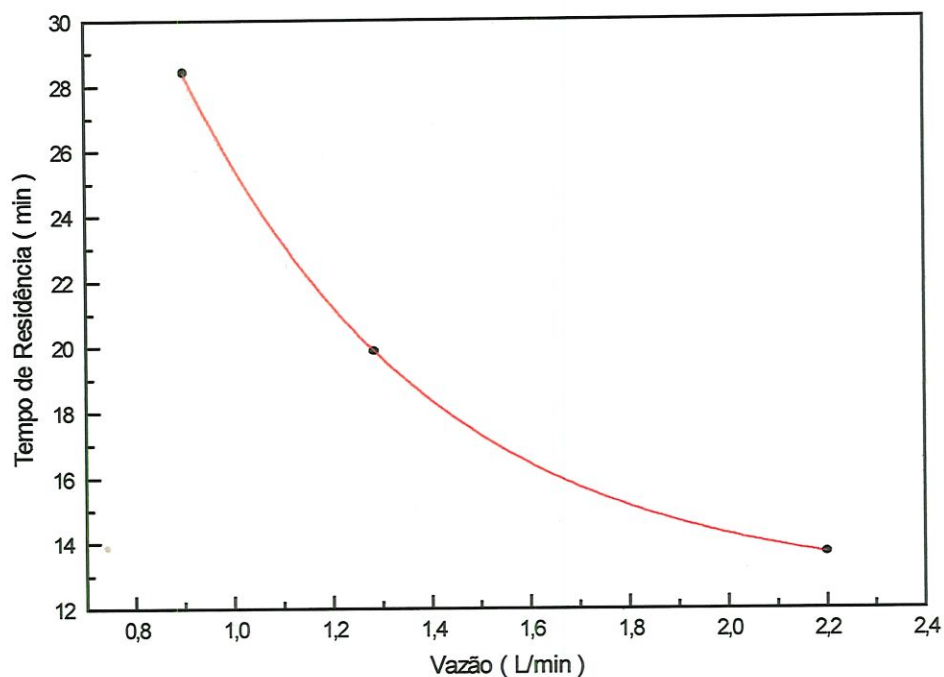
A partir das Tabelas 3, 4 e 5 foram construídos os gráfico do tempo de residência pela vazão de entrada.



**Figura 44** - Dependência do tempo de residência vazão pela vazão de entrada em escoamento livre.



**Figura 45** - Dependência da vazão de entrada pelo tempo de residência em configuração S.



**Figura 46** - Dependência do tempo de residência pela vazão de entrada em configuração U

### 5.5. Perfil de Temperaturas com a Profundidade do Modelo

O perfil de temperatura mostra como a temperatura da água se distribui no interior do modelo, sendo um dos fatores que caracterizam o tipo de lagoa de resfriamento.

O perfil do modelo foi retirado em várias posições ao longo do escoamento, mostrando como este perfil se modifica com o resfriamento da água.

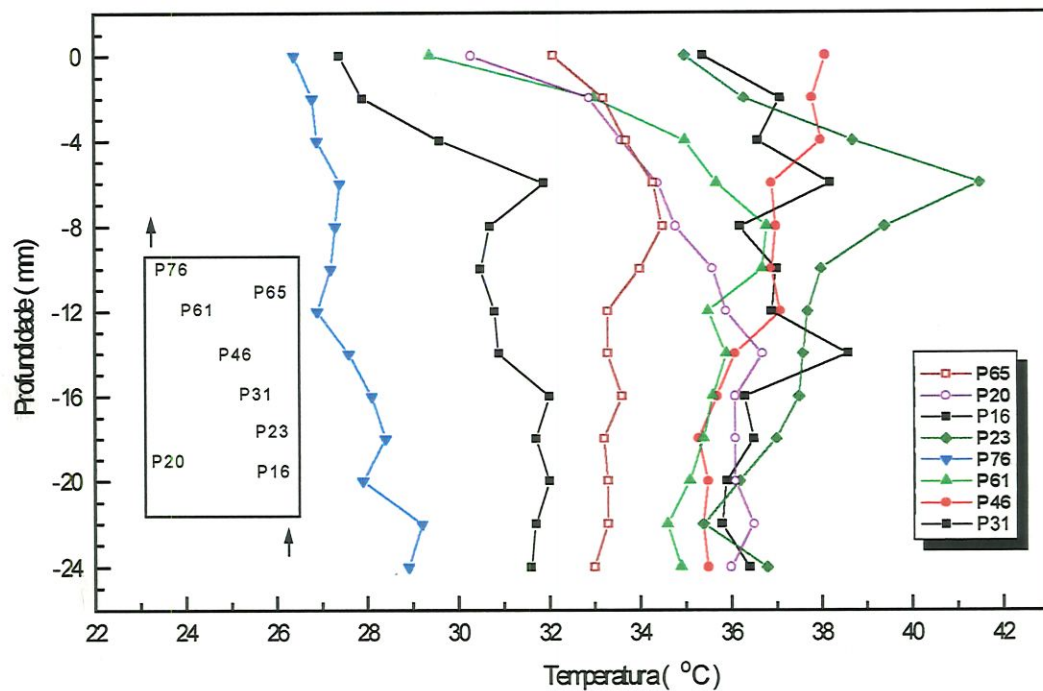
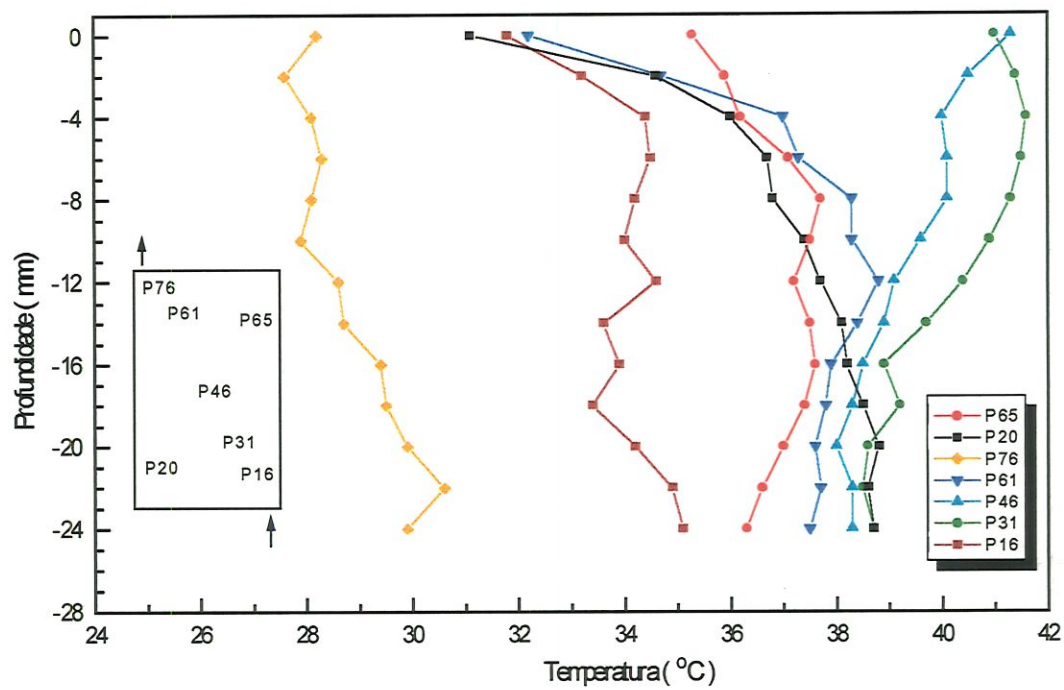
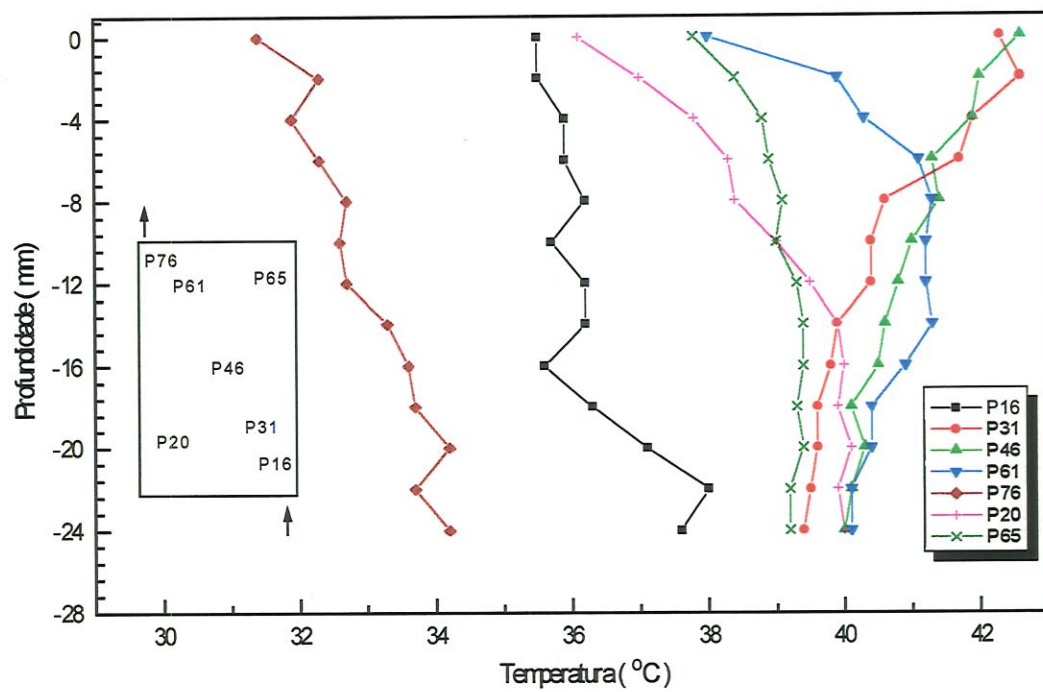


Figura 47- Perfil de temperatura no escoamento livre em vazão baixa.



**Figura 48** - Perfil de temperatura no escoamento livre em vazão média.



**Figura 49** - Perfil de temperatura no escoamento livre vazão alta.

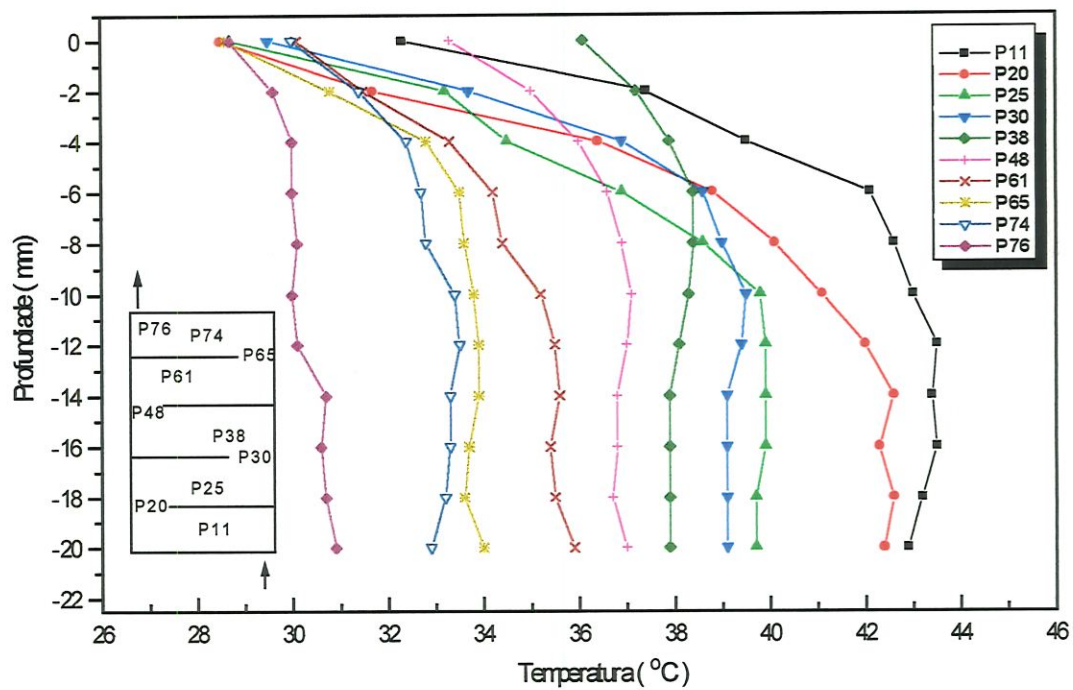


Figura 50 - Perfil de temperatura na configuração S em vazão baixa.



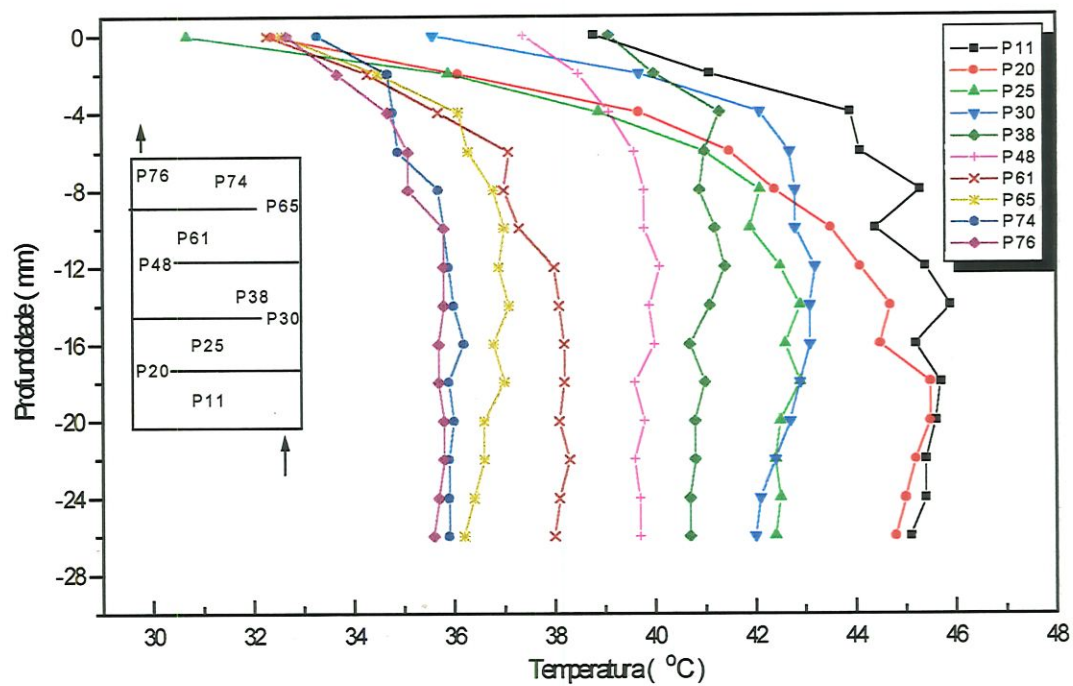


Figura 51 - Perfil de temperatura na configuração S em vazão média.

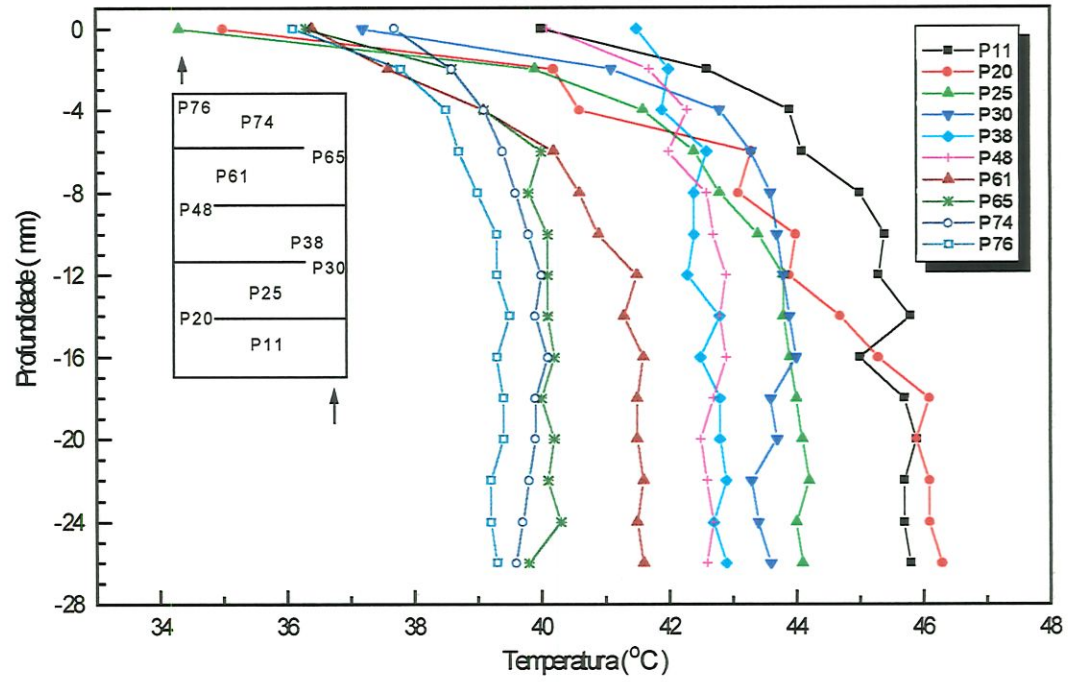


Figura 52 - Perfil de temperatura na configuração S em vazão alta.

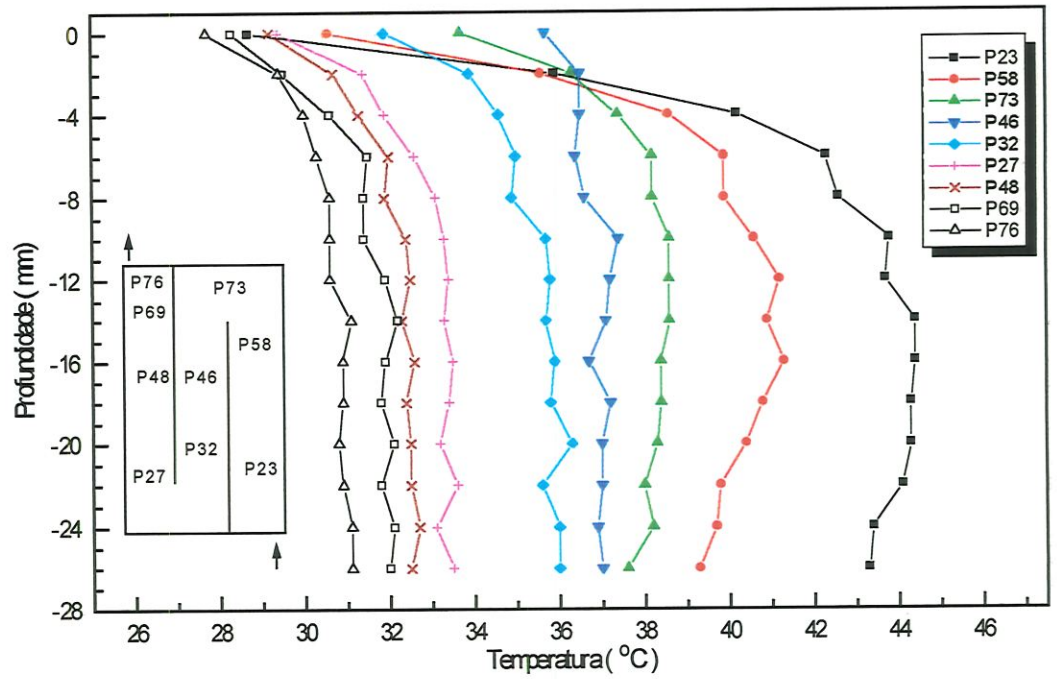


Figura 53 - Perfil de temperatura na configuração U em vazão baixa.

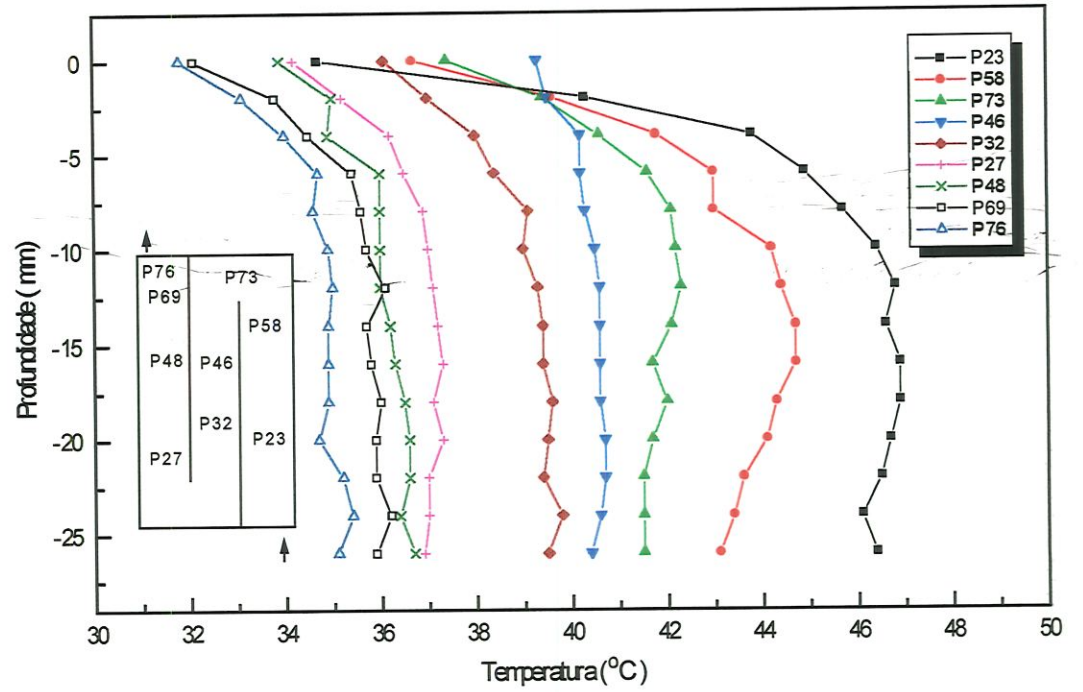
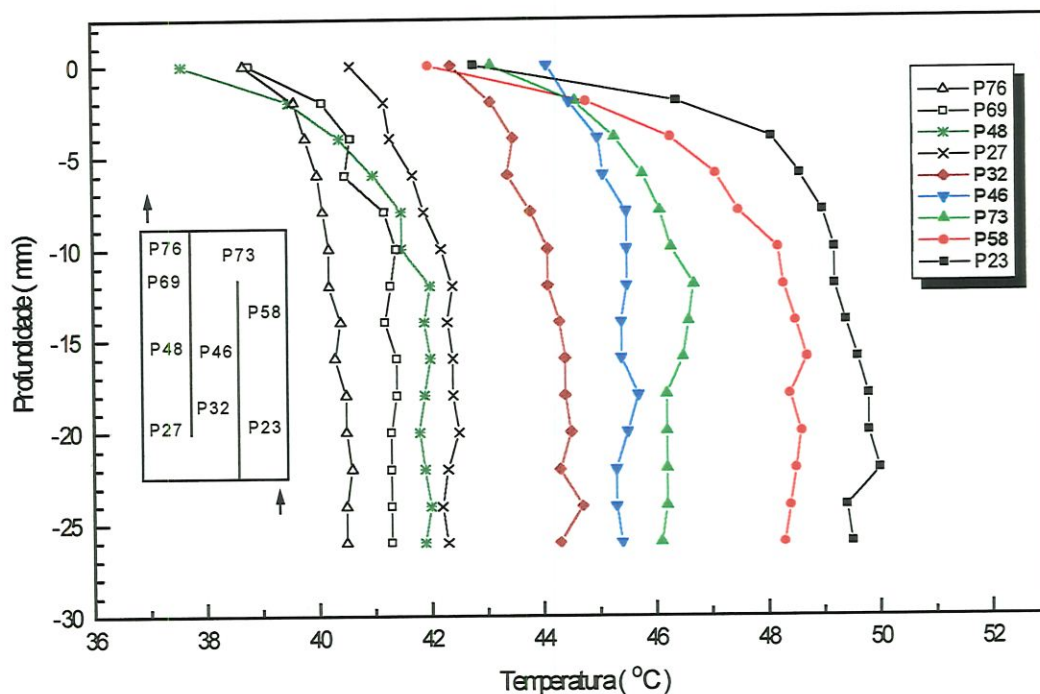


Figura 54 - Perfil de temperatura na configuração U em vazão média.



**Figura 55** - Perfil de temperatura na configuração U em vazão alta.

Pela análise dos perfis de temperatura nota-se que estes são regulares nas configurações S e U, onde o escoamento é bem definido, já no caso do escoamento livre, onde a recirculação é predominante, uma perturbação na estrutura térmica interna, não apenas superficialmente.

## 5.6. Temperatura da Água ao Longo do Escoamento

Também foi estudado como a temperatura se comporta ao longo do escoamento tomando as medidas nos termopares posicionados ao longo do escoamento principal das configurações S e U.

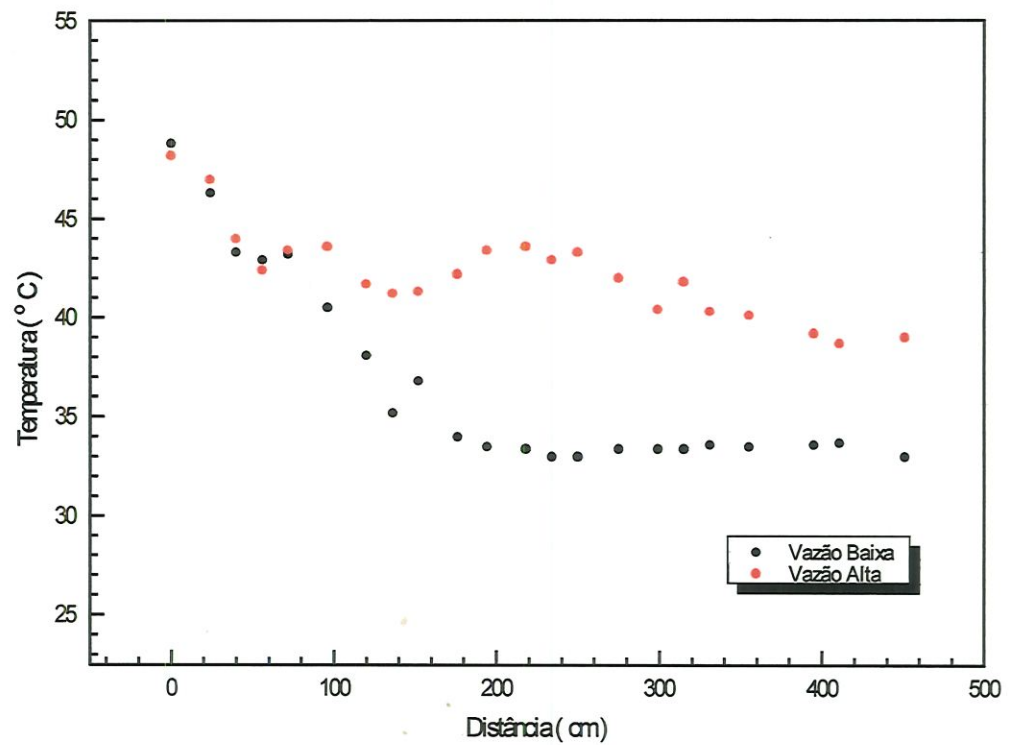
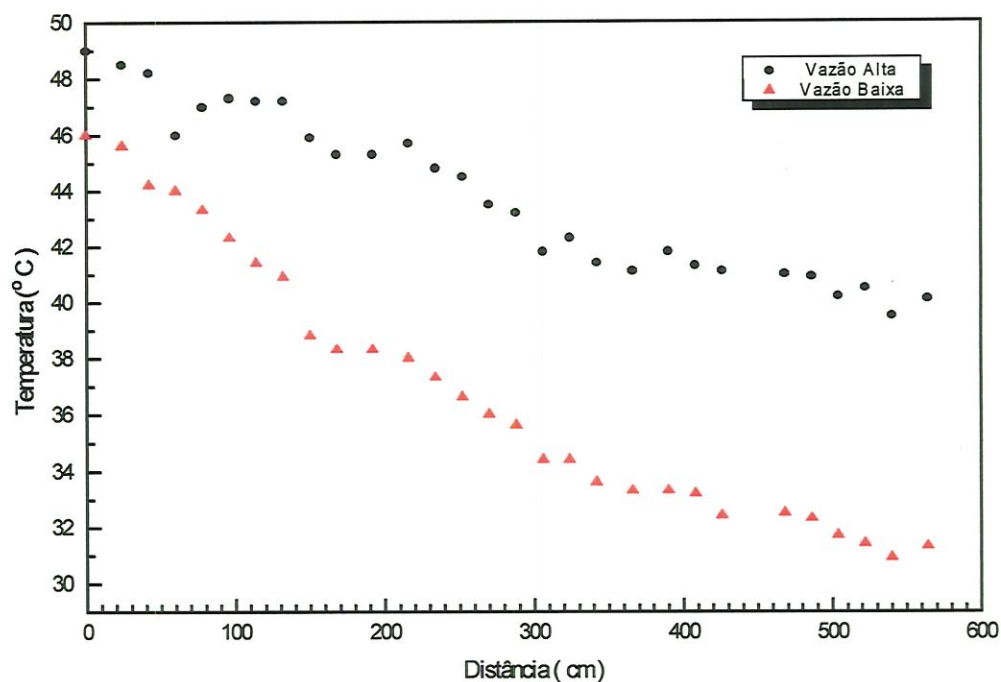


Figura 56 - Temperatura ao longo do escoamento tipo S.



**Figura 57** - Temperatura ao longo do escoamento tipo U.

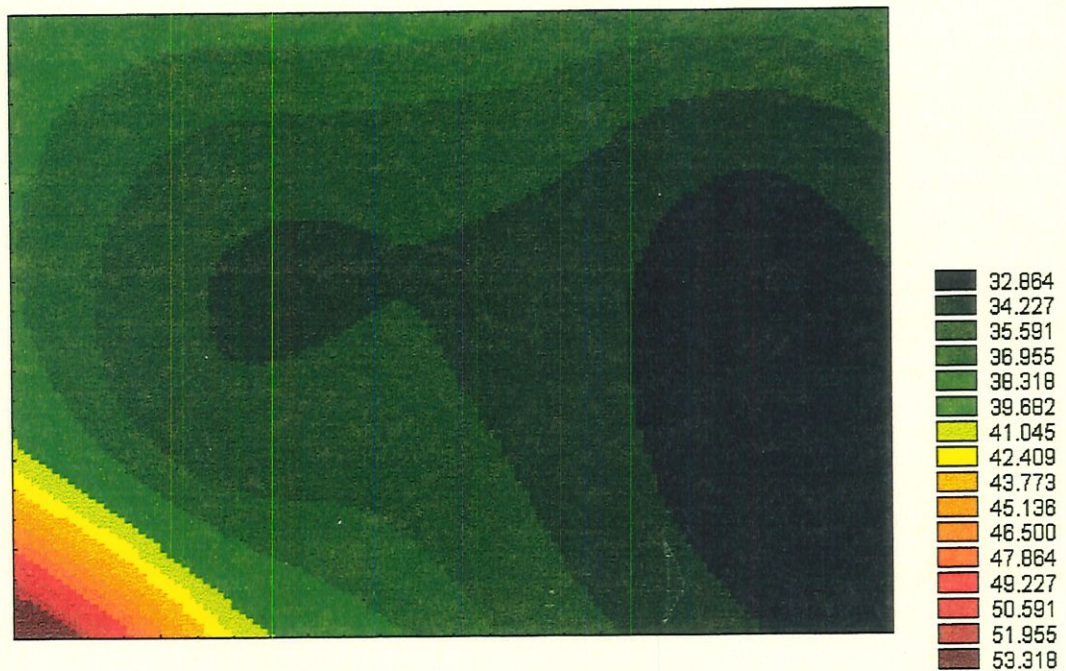
Na configuração U a temperatura apresenta um comportamento mais definido que no tipo S possivelmente devido a menor influência das chicanas pela disposição que estas ocupam em cada montagem.

### 5.7. Isotermas

Por interpolação dos pontos de temperatura foram montadas as isotermas em diferentes níveis de profundidade. Desta maneira pode-se obter o campo de temperaturas em cada nível de profundidades. As interpolações foram realizadas por meio de um software, que usou para interpolar os pontos uma função polinomial (“spline”).

Somente a configuração livre foi estudada, devido as limitações do programa para interpolar regiões do modelo onde existem as chicanas.

Na sequência são apresentadas as isotermas em três níveis de profundidade (2 mm, 12 mm e 22 mm ) para cada uma das vazões estudadas.



**Figura 58** - Isotermas para vazão baixa em 2 mm de profundidade.



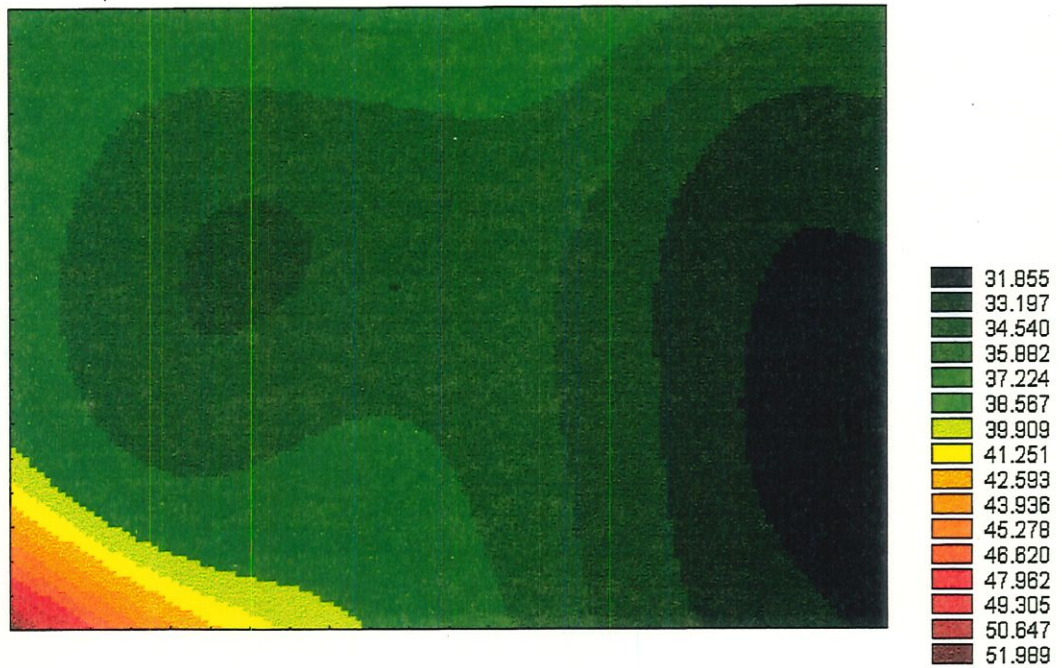
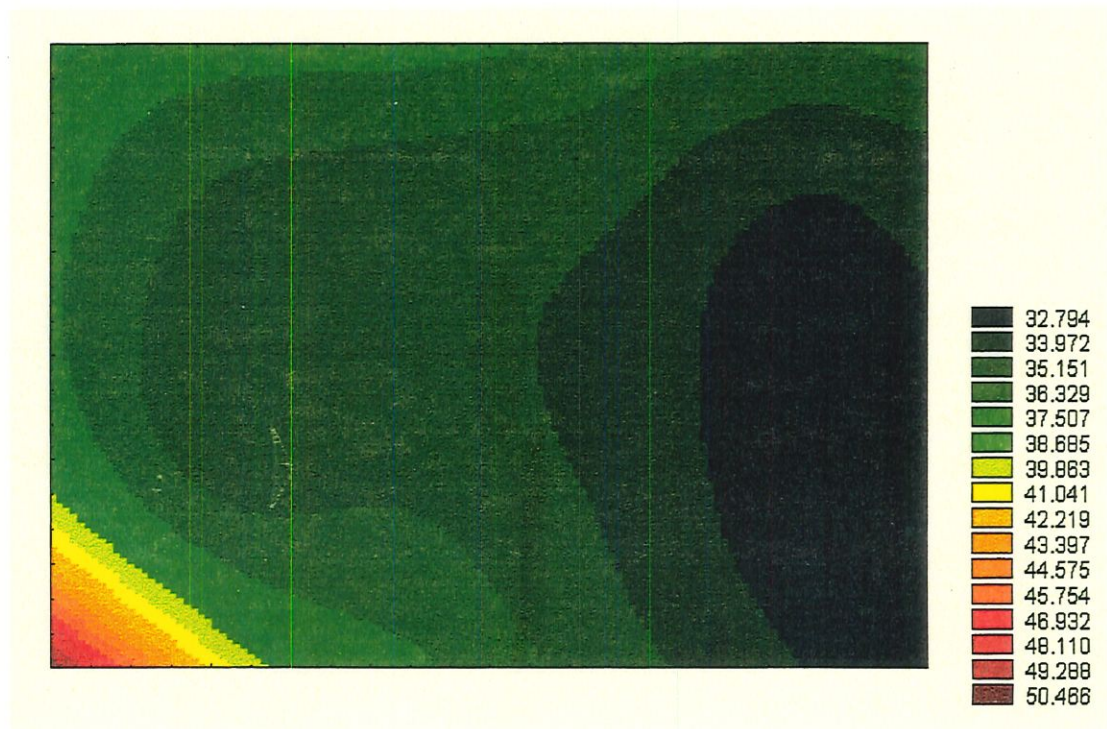
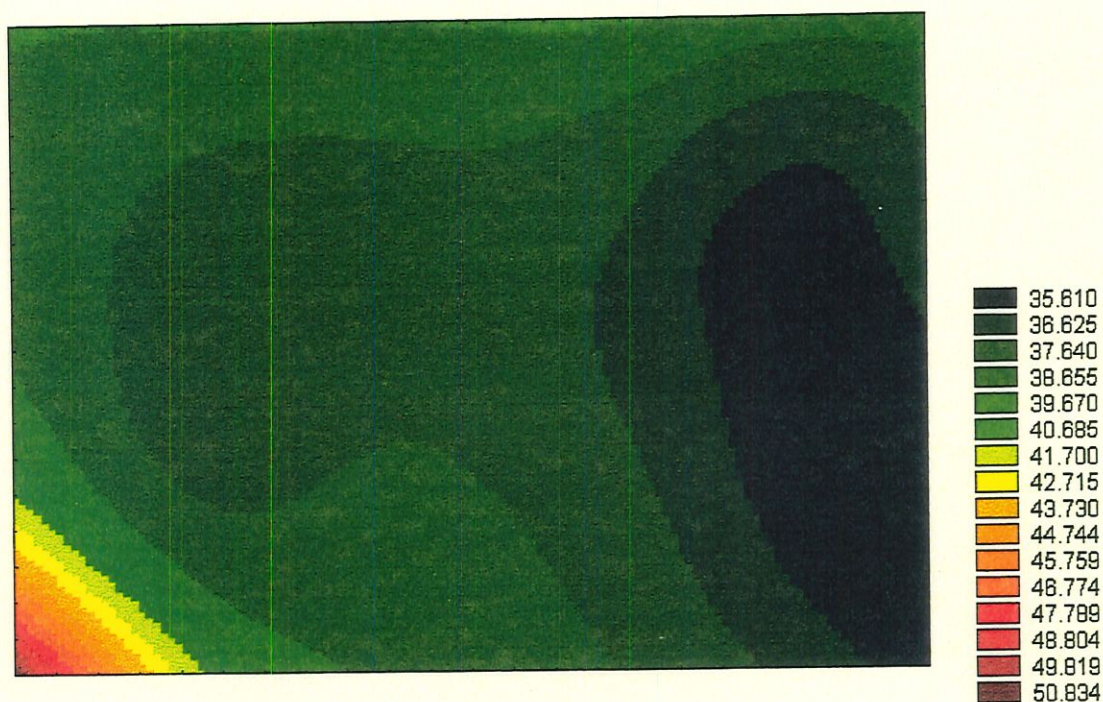


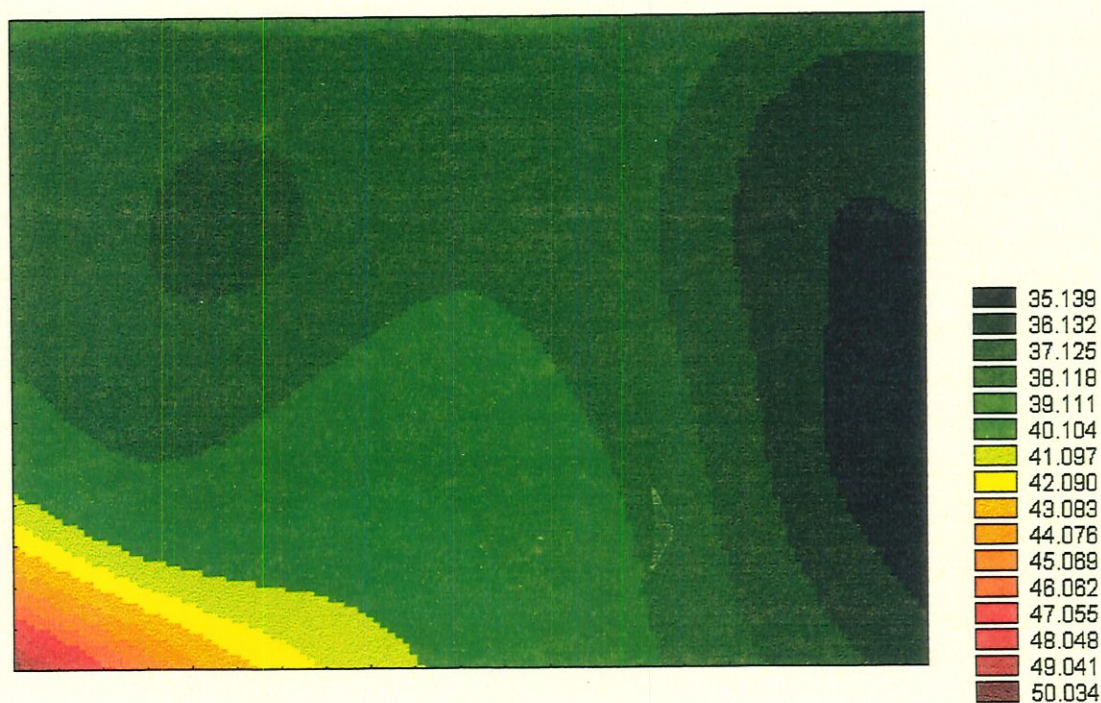
Figura 59 - Isotermas para vazão baixa em 12 mm de profundidade.



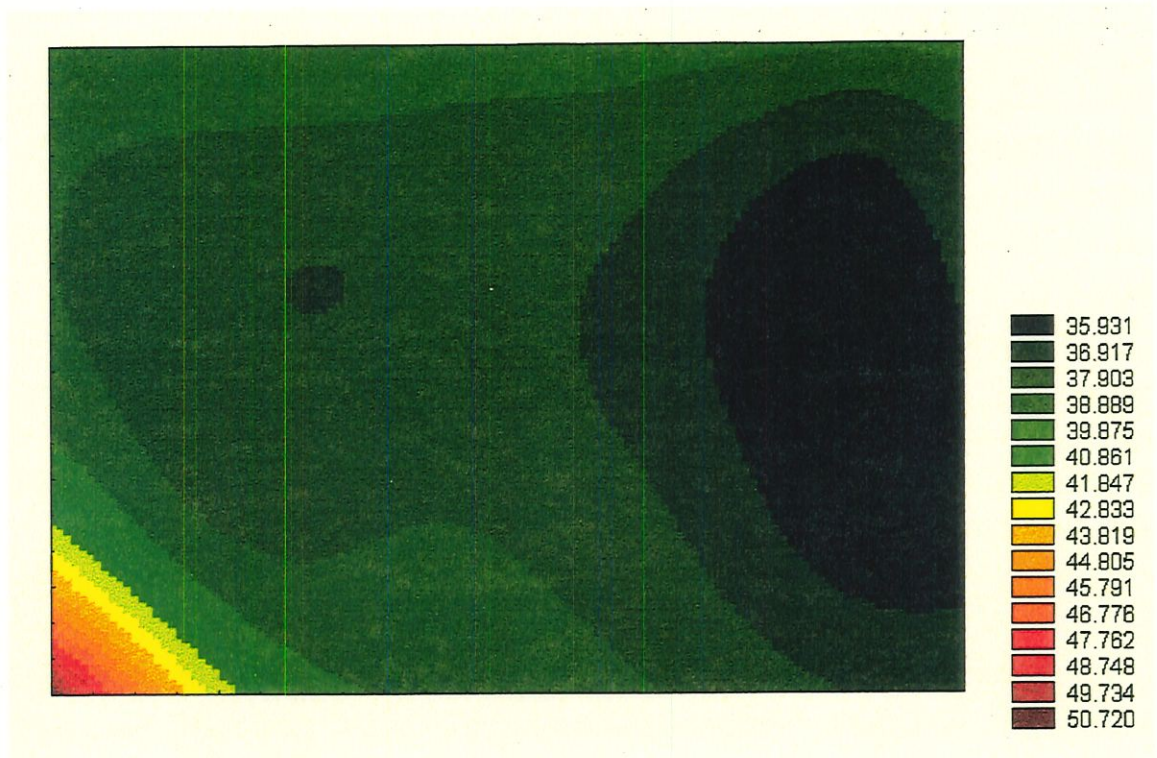
**Figura 60** - Isotermas para vazão baixa em 22 mm de profundidade.



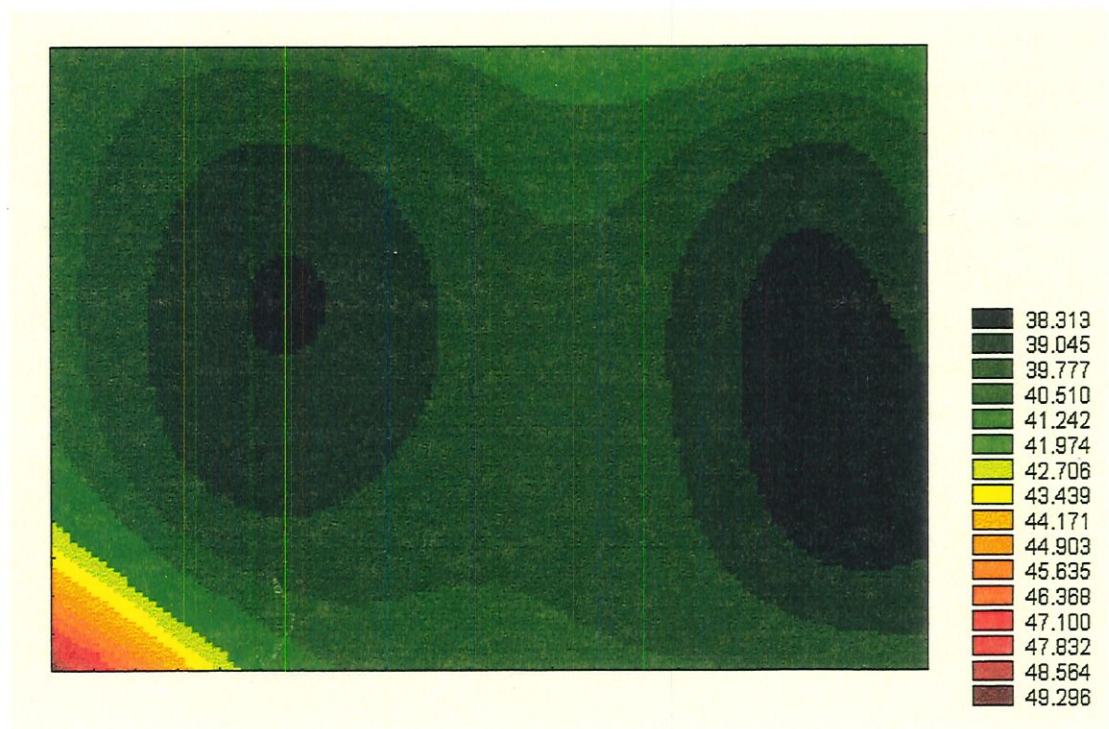
**Figura 61** - Isotermas para vazão média em 2 mm de profundidade.



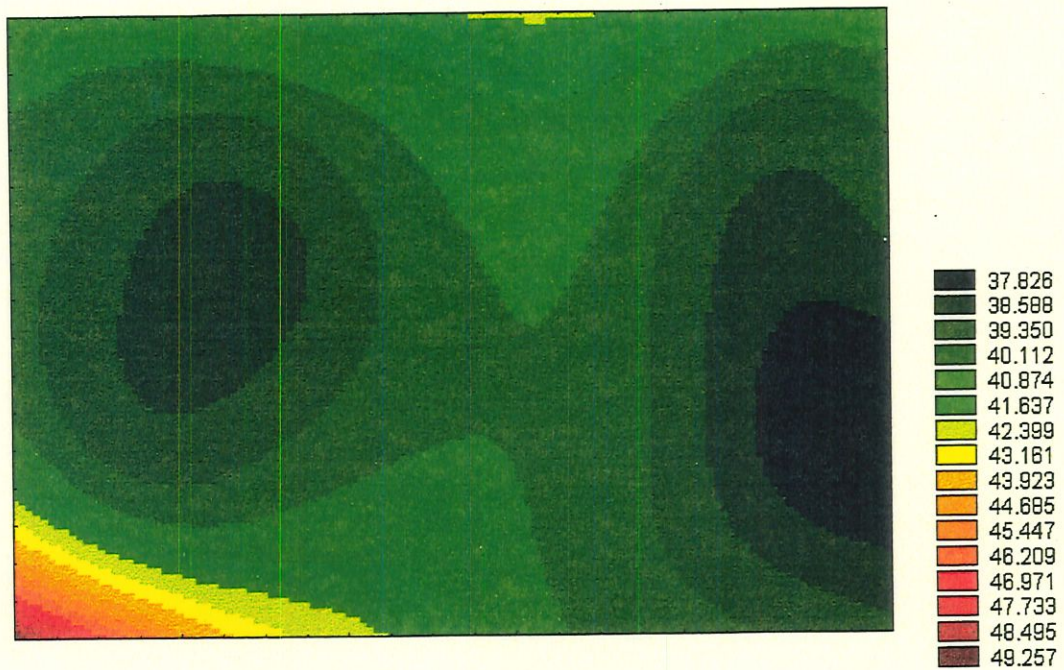
**Figura 62** - Isotermas para vazão média em 12 mm de profundidade.



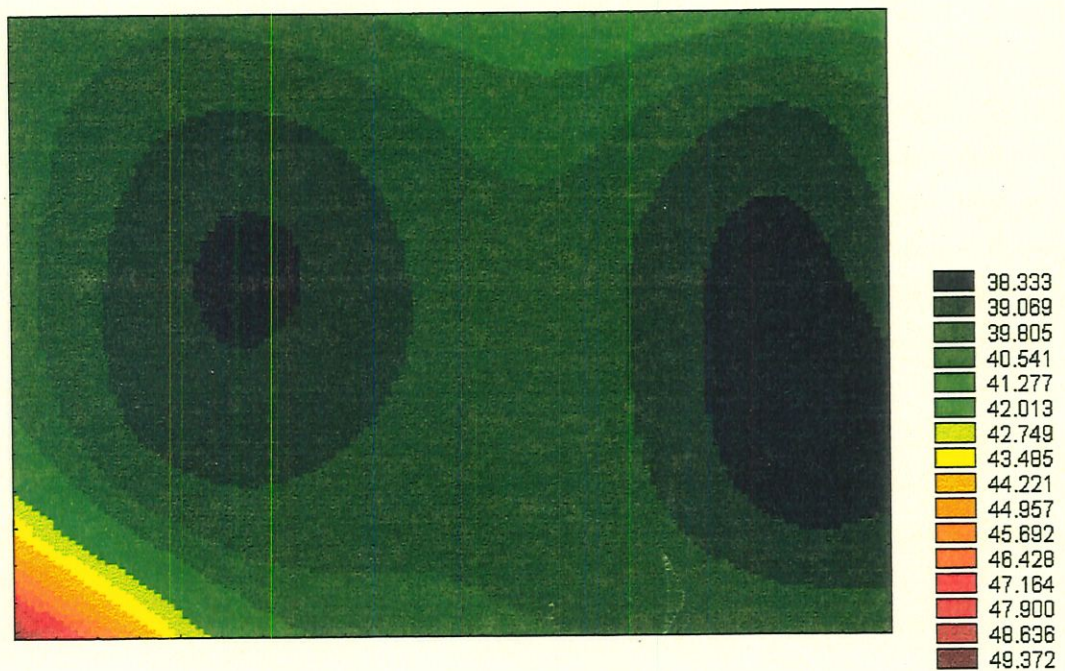
**Figura 63** - Isotermas para vazão média em 22 mm de profundidade.



**Figura 64** - Isotermas para vazão alta em 2 mm de profundidade.



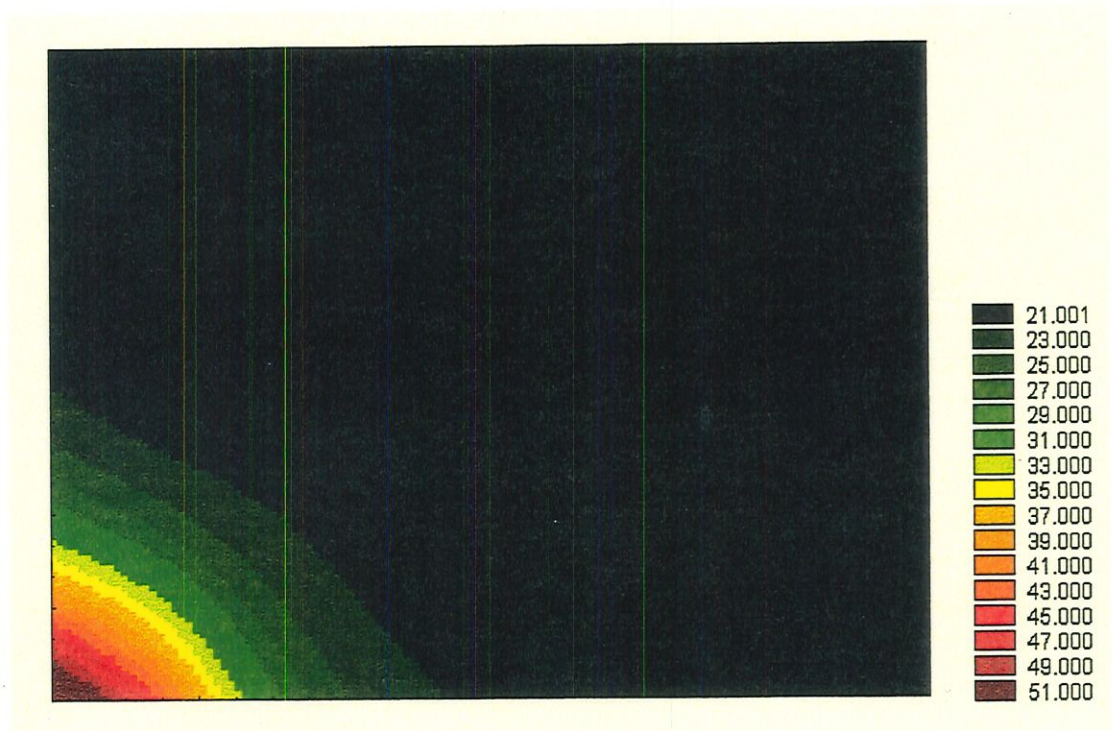
**Figura 65** - Isotermas para vazão alta em 12 mm de profundidade.



**Figura 66** - Isotermas para vazão alta em 22 mm de profundidade.

N regime transiente pode-se visualizar como de dá a entrada da descarga pelas isothermas formadas nos instantes sucessivos

Na sequência são apresentadas as isothermas na profundidade de 4 mm em diferentes intervalos de tempo mostrando como esta evolui no tempo..



**Figura 67** - Isotherma para o instante 10 segundos após a descarga

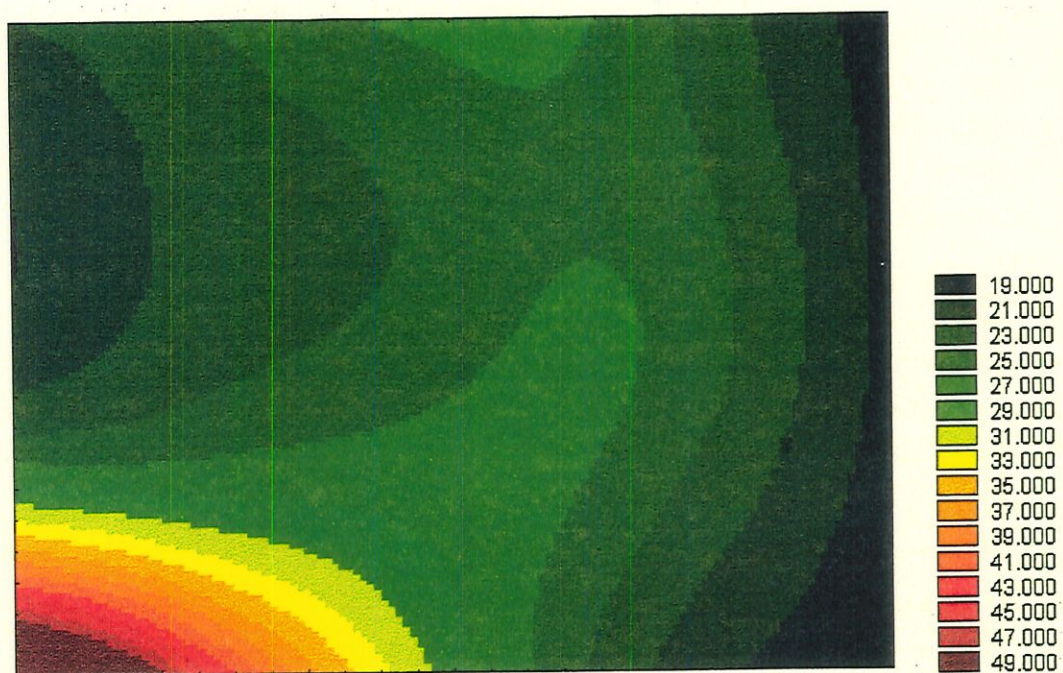


Figura 68 - Isotermas para 2 minutos após a descarga

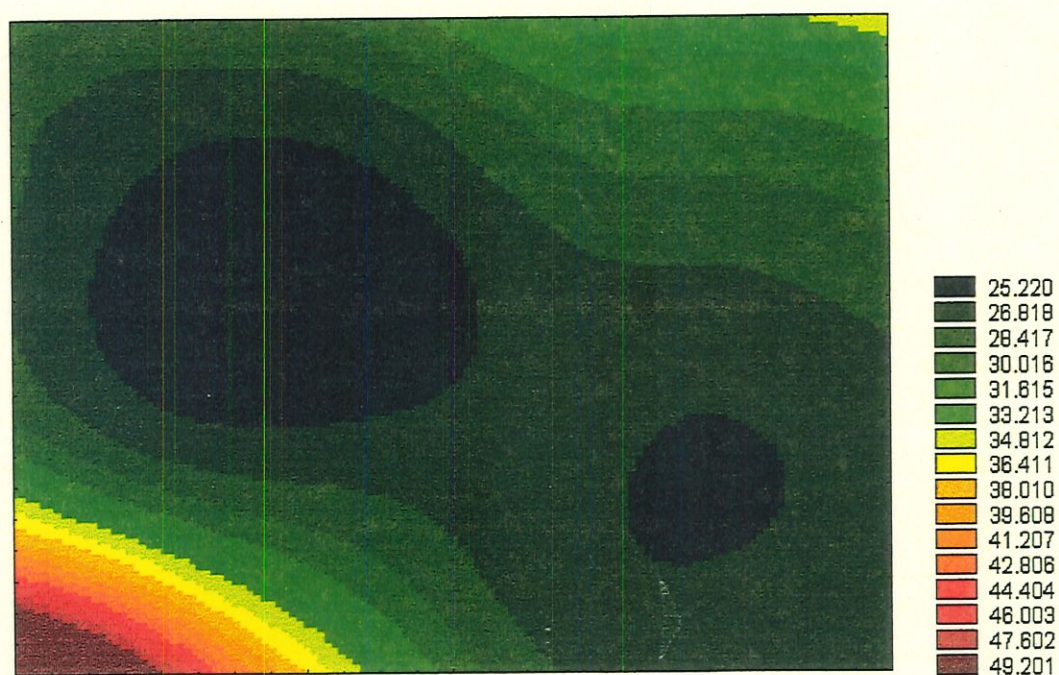
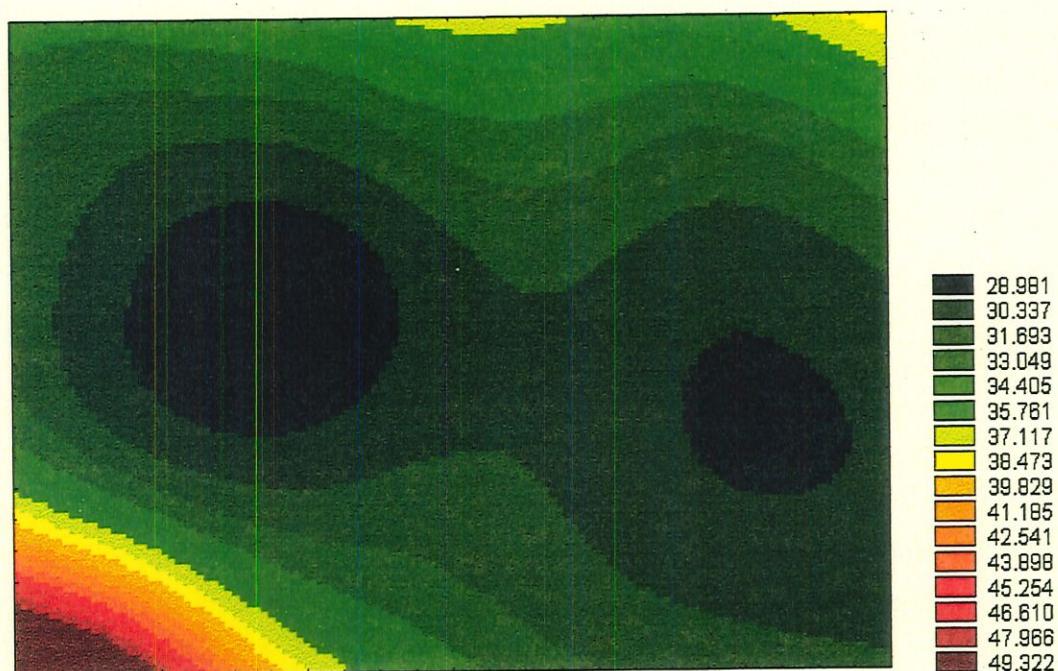
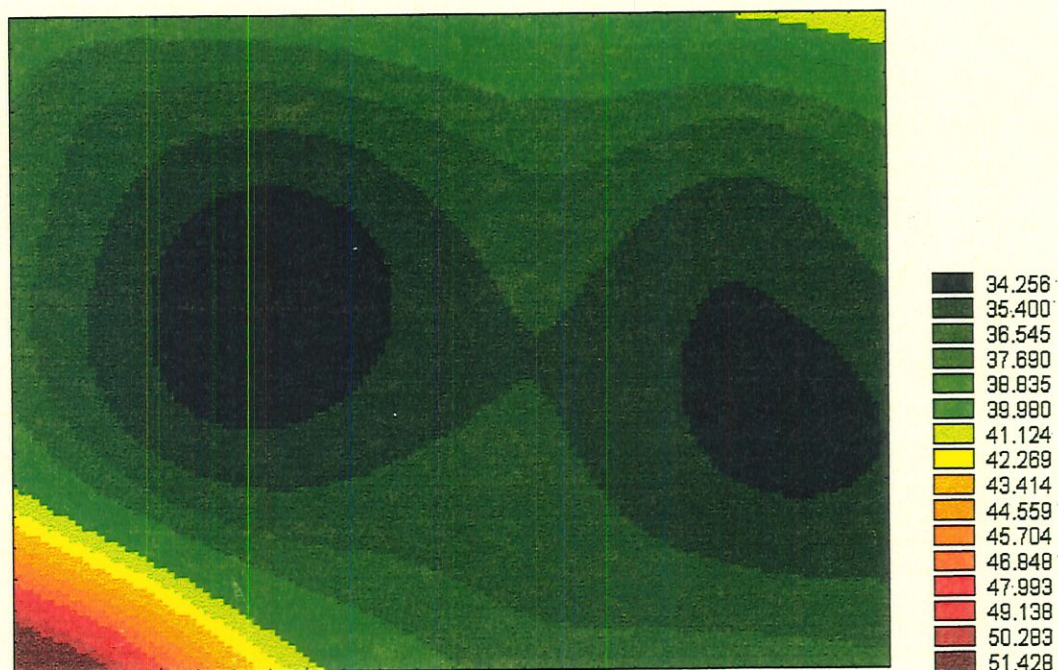


Figura 69 - Isotermas para 4 minutos após a descarga



**Figura 70** - Isotermas para 10 minutos após a descarga



**Figura 71** - Isotermas para 30 minutos após a descarga

## 5.8. Estudo do Escoamento Superficial e de Fundo no Modelo

Para o estudo dos escoamentos superficiais e próximo ao fundo, foram estudadas duas configurações a livre e a tipo S, com isto obteve-se por meio da análise do movimento de partículas e de plumas coloridas, os escoamentos superficiais e próximo ao fundo. No escoamento de fundo foi notado visualmente que ocorre um retorno da água na direção da entrada em uma camada de aproximadamente 3mm.

### 5.8.1. Escoamento Superficial da Configuração Livre

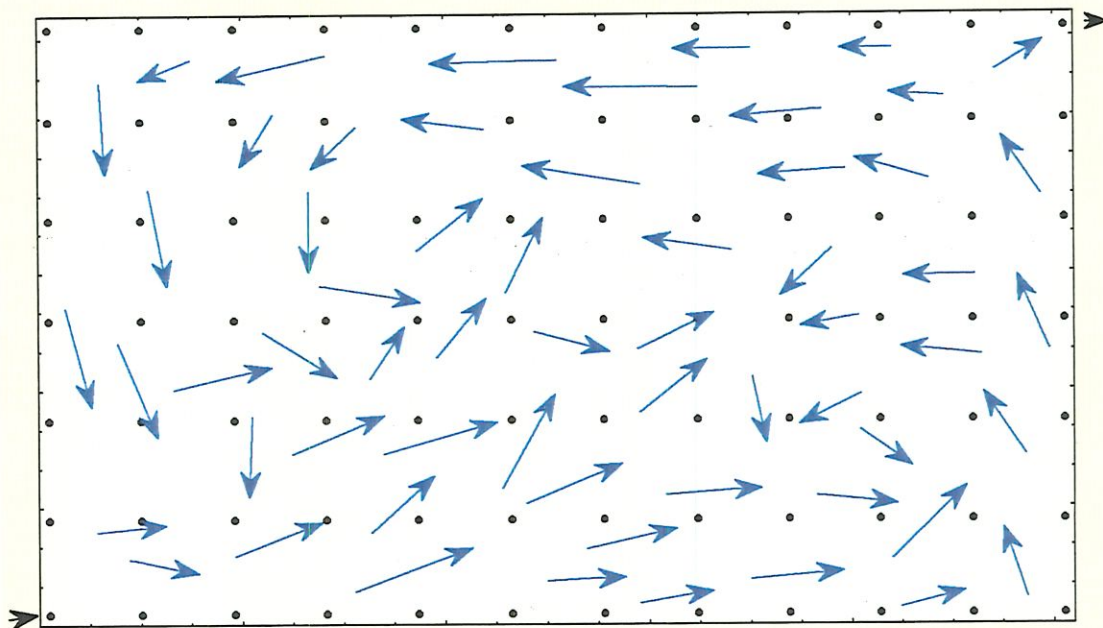


Figura 72 - Escoamento superficial na configuração livre

No escoamento superficial nota-se a formação de duas regiões de recirculação que são também observadas nas isotermas da figura 58 que

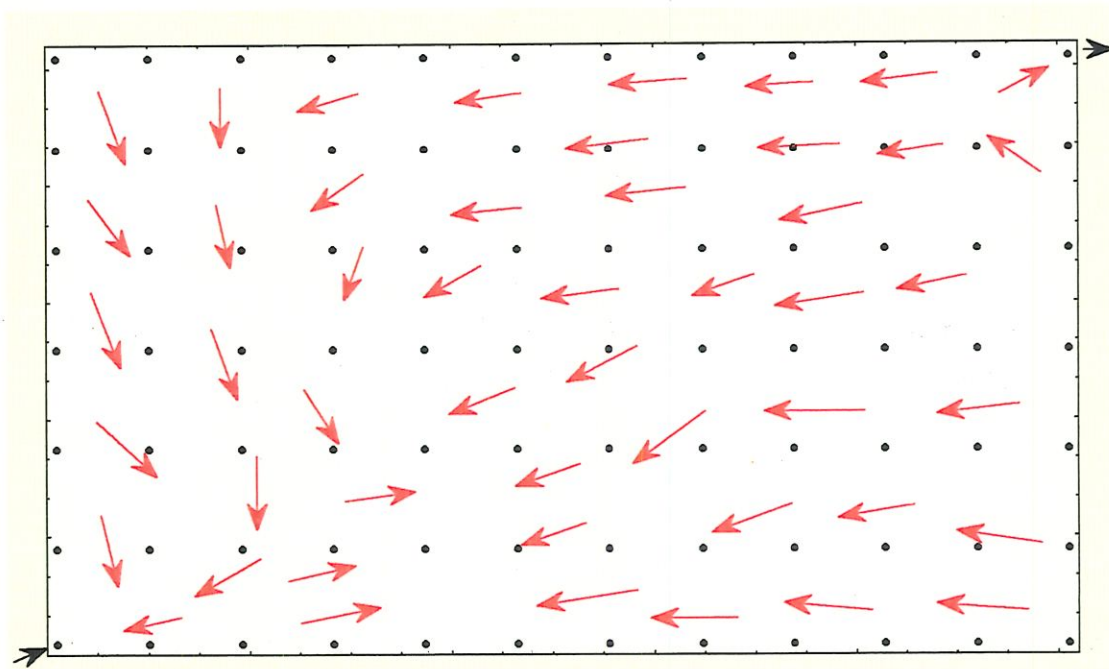


mostra a configuração térmica a 2mm de profundidade, região do escoamento superficial

Na classificação da lagoa em termos de sua circulação tem-se para o caso da configuração os seguintes parâmetros a área  $A$  da lagoa e o comprimento médio do caminho percorrido pelo escoamento  $L$ .

$W = A/L = 2 / 2,84 = 0,70 < 4$  neste caso o modelo é classificado como uma lagoa de recirculação, como é observado pelo gráfico da figura 72.

### 5.8.2. Escoamento Próximo ao Fundo da Configuração Livre

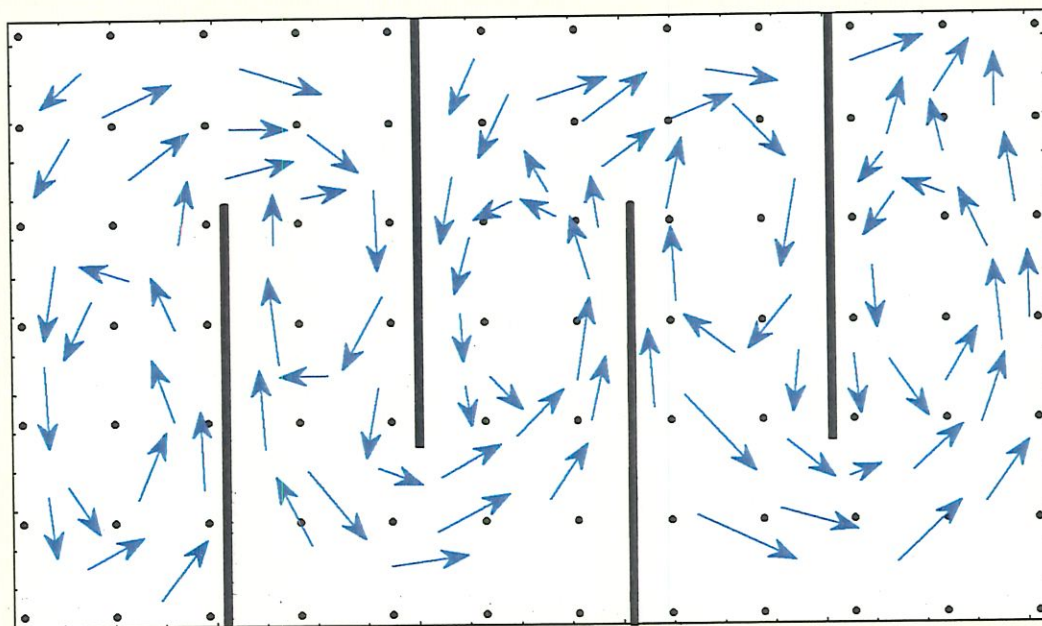


**Figura 73** - Escoamento de fundo na configuração livre

No escoamento de fundo observa-se que o escoamento vai na direção da maior temperatura devido a diferença de densidade que faz com que ocorra uma camada superior com temperatura mais elevada escoando sobre uma outra

de temperatura menor, este mecanismo é conhecido como celas ou células de recirculação vertical, é um mecanismo que também ocorre em lagoas de resfriamento.

### 5.8.3. Escoamento Superficial Configuração Tipo S



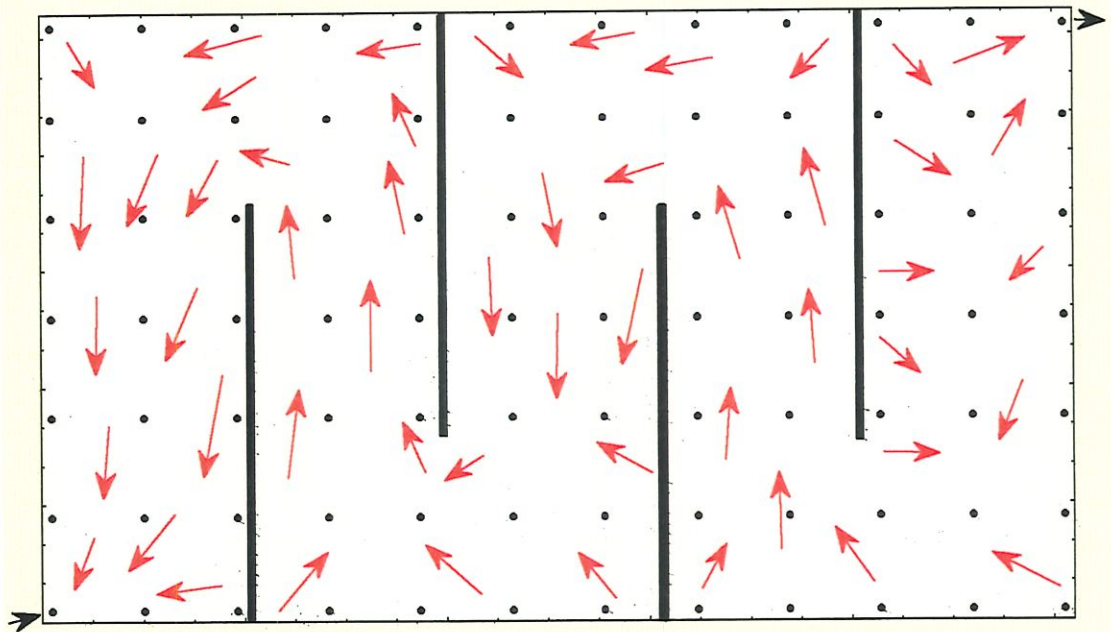
**Figura 74** - Escoamento superficial na configuração tipo S

Para o escoamento superficial na configuração tipo S é observado a formação de várias recirculações em cada compartimento limitado pelas chicanas. Estas recirculações decorrem principalmente pela influência das chicanas que forçam a água a um descolamento nas regiões de curva para o escoamento. Estas recirculações são mais intensas quanto mais próximas a entrada onde a influência das correntes de densidades são mais acentuadas.

Quanto ao critério de classificação para o caso da configuração tipo S tem-se os valores :

$W = A / L = 2 / 15,75 = 0,13 < 4$  o que classifica o modelo com esta disposição de escoamento em um lagoa de recirculação, como pode-se observar do gráfico 74.

#### 5.8.4. Escoamento Próximo ao Fundo da Configuração Livre



**Figura 75** - Escoamento de fundo na configuração tipo S

No escoamento de fundo para a configuração S nota-se claramente que o escoamento se dá na direção da região de maior temperatura pelo mesmo mecanismo descrito na configuração anterior.

Este é um fenômeno térmico devido a maior temperatura da água da descarga, pois análises realizadas nas mesmas condições com escoamento com temperatura ambiente e com água resfriada não mostrou este comportamento de retorno no campo próximo ao fundo.

### 5.9. Determinação da Perda de Calor do Modelo Reduzido

Utilizado-se da formulação descrita na revisão bibliográfica e de parâmetros medidos em laboratório tais como pressão atmosférica, umidade relativa do ar, altura geográfica da USP - São Carlos, tabela de temperatura de equilíbrio e as medidas obtidas pelo equipamento foi possível analisar a perda de calor média de cada configuração do modelo. Abaixo tem-se uma tabela dos valores obtidos:

**Tabela 9 - Quadro dos cálculos da perda de calor superficial**

| Configuração | $P_{atm}$ (mmHg) | $e_s$ (mmHg) | $e_a$ ( mmHg ) | UR ( % ) | $T_e(^{\circ}F)$ | $T_{sv} (^{\circ}F)$ | $T_{sa} (^{\circ}F)$ |
|--------------|------------------|--------------|----------------|----------|------------------|----------------------|----------------------|
| L V Baixa    | 684,79           | 20,80        | 14,16          | 0,68     | 67,40            | 92,39                | 73,42                |
| L V Média    | 684,87           | 21,21        | 14,68          | 0,69     | 68,08            | 96,94                | 74,02                |
| L V Alta     | 684,81           | 20,90        | 15,12          | 0,72     | 68,25            | 102,75               | 73,60                |
| S V Baixa    | 684,85           | 21,12        | 14,44          | 0,68     | 67,99            | 87,87                | 73,88                |
| S V Média    | 685,01           | 21,97        | 15,74          | 0,72     | 69,63            | 95,09                | 75,11                |
| S V Alta     | 684,98           | 21,84        | 16,19          | 0,74     | 69,81            | 100,45               | 74,95                |
| S U Baixa    | 684,64           | 20,03        | 13,99          | 0,70     | 66,70            | 88,67                | 72,28                |
| S U Média    | 684,80           | 20,84        | 15,39          | 0,74     | 68,51            | 95,16                | 73,52                |
| U V Alta     | 685,05           | 22,24        | 16,88          | 0,76     | 70,63            | 105,72               | 75,53                |

| Configuração | $f(w)$ | $Q_{in}$<br>(Btu/ft <sup>2</sup> dia) | $Q_{out}$<br>(Btu/ft <sup>2</sup> dia) | $Q_{evap+conduc}$<br>(Btu/ft <sup>2</sup> dia) | $Q_{in}-Q_{out}-Q_{e+c}$<br>(Btu/ft <sup>2</sup> dia) | $K$ (Btu/ft <sup>2</sup> ) | Perda de calor<br>(Btu/ft <sup>2</sup> dia)r |
|--------------|--------|---------------------------------------|--|--|---|----------------------------|--|
| L V Baixa    | 59,75  | 3224,44                               | 3704,91                                | 683,61   | -1164,08  | 47,96                      | 1164,08                                      |
| L V Média    | 63,63  | 3238,40                               | 3826,78                                | 783,96   | -1372,34  | 48,89                      | 1372,34                                      |
| L V Alta     | 68,94  | 3227,92                               | 3987,29                                | 906,65   | -1666,02  | 49,52                      | 1666,02                                      |
| S V Baixa    | 53,97  | 3235,34                               | 3585,49                                | 551,34   | -901,49   | 47,00                      | 901,49                                       |
| S V Média    | 60,78  | 3263,83                               | 3775,03                                | 685,60   | -1196,80  | 48,59                      | 1196,80                                      |
| S V Alta     | 65,93  | 3259,43                               | 3921,28                                | 797,22   | -1459,07  | 49,05                      | 1459,07                                      |
| U V Baixa    | 56,89  | 3197,51                               | 3606,77                                | 578,95   | -988,22   | 46,44                      | 988,22                                       |
| U V Média    | 62,42  | 3225,74                               | 3777,48                                | 681,31   | -1233,05  | 47,71                      | 1233,05                                      |
| U V Alta     | 69,75  | 3272,63                               | 4068,63                                | 905,47   | -1701,46  | 49,88                      | 1701,46                                      |

Da tabela vê-se que o coeficiente de trocas superficial apresenta valores próximos mostrando ser proporcional com a vazão, também a perda de calor mostra-se crescente com a vazão, isto pode ser explicado porque com uma vazão maior tem-se uma temperatura superficial mais elevada com isto uma maior perda de calor.

### 5.10. Determinação do Número de Pond do Modelo

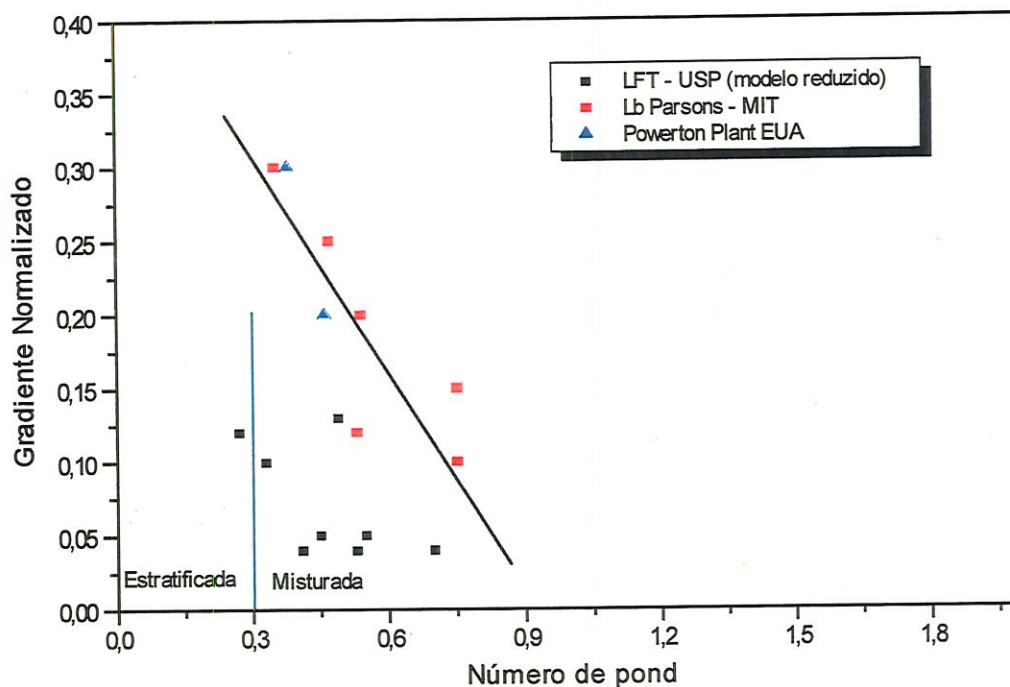
Para a determinação do adimensional de pond foram utilizados valores típicos de lagoas de resfriamento operando em condições de laboratório [24], onde  $f_i = 0,1$ ,  $\beta = 0,00018 \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$  e  $Dv = 1,5$ , juntamente com os valores de vazão usada em cada experimento. O adimensional foi estimado para cada experimento. Abaixo na tabela 10 os valores obtidos nos cálculos.

**Tabela 10 - Cálculo do numero de pond do modelo**

| $Q^2(\text{ft}^3)^2$ | $\beta \text{ (}^\circ\text{F}^{-1}\text{)}$ | $\Delta T_o \text{ (}^\circ\text{F)}$ | $f_i$ | L (ft) | $W^2(\text{ft}^2)$ |
|----------------------|--|---------------------------------------|-------|--------|--------------------|
| 2,7458E-07           | 0,00018                                      | 32,04                                 | 0,1   | 9,32   | 5,33154046         |
| 5,329E-07            | 0,00018                                      | 28,3                                  | 0,1   | 9,32   | 5,33154046         |
| 1,5129E-06           | 0,00018                                      | 16,8                                  | 0,1   | 9,32   | 5,33154046         |
| 2,6832E-07           | 0,00018                                      | 28,8                                  | 0,1   | 15,75  | 1,86691015         |
| 4,9844E-07           | 0,00018                                      | 27,9                                  | 0,1   | 15,75  | 1,86691015         |
| 1,7161E-06           | 0,00018                                      | 16,9                                  | 0,1   | 15,75  | 1,86691015         |
| 2,809E-07            | 0,00018                                      | 34,7                                  | 0,1   | 19,03  | 1,27881275         |
| 5,6701E-07           | 0,00018                                      | 30,2                                  | 0,1   | 19,03  | 1,27881275         |
| 1,6641E-06           | 0,00018                                      | 19,8                                  | 0,1   | 19,03  | 1,27881275         |

| $H^4 \text{ (ft}^4\text{)}$ | $Dv^3$ | $g \text{ (ft/s}^2\text{)}$ |  | P    | $\Delta T_v/\Delta t_o$ |
|-----------------------------|--------|-----------------------------|--|------|-------------------------|
| 3,895E-05                   | 3,375  | 32,15                       |  | 0,27 | 0,12                    |
| 3,895E-05                   | 3,375  | 32,15                       |  | 0,33 | 0,10                    |
| 3,895E-05                   | 3,375  | 32,15                       |  | 0,49 | 0,13                    |
| 3,895E-05                   | 3,375  | 32,15                       |  | 0,41 | 0,04                    |
| 5,2201E-05                  | 3,375  | 32,15                       |  | 0,45 | 0,05                    |
| 5,2201E-05                  | 3,375  | 32,15                       |  | 0,70 | 0,04                    |
| 1,8975E-05                  | 3,375  | 32,15                       |  | 0,55 | 0,05                    |
| 5,2201E-05                  | 3,375  | 32,15                       |  | 0,53 | 0,04                    |
| 5,2201E-05                  | 3,375  | 32,15                       |  | 0,77 | 0,051                   |

Na tabela observa-se que de acordo com a classificação do adimensional os experimentos a menos da configuração livre em condições de vazão baixa, todos os demais se enquadram como uma lagoa de resfriamento rasa mostrando um valor de pond maior que 0,3 e também o gradiente normalizado bastante pequeno confirmando a condição de lagoa de resfriamento rasa.



**Figura 76** - Comparação dos dados obtidos com valores da literatura

No gráfico vê-se a relação do número de pond e do gradiente normalizado de estudos em lagoas de resfriamento em laboratório e em campo, juntamente com os pontos obtidos neste trabalho. Os valores do gradiente normalizado foram bastante baixo quando comparados aos outros dados, isto provavelmente se deve a pequena profundidade do modelo o que não permite uma diferença de temperatura muito elevada entre a superfície e o fundo, o que propicia um baixo valor para o gradiente normalizado.

## 6. CONCLUSÕES

O trabalho mostrou a importância do desenvolvimento e aplicação da instrumentação automática de medidas, pois esta possibilitou a realização de um grande número de medidas em um curto intervalo de tempo, tarefa difícil de ser realizada manualmente. Além disto o interfaceamento da instrumentação com um microcomputador, fez com que todo processo de medição fosse facilitado.

A instrumentação foi testada com êxito em um modelo reduzido de uma lagoa de resfriamento mostrando bastante versatilidade no processo de medição e aquisição de medidas de temperatura.

Por meio da análise do regime transiente e permanente da temperatura na saída do modelo foi determinado o tempo de residência do modelo nas diferentes configurações e níveis de vazão, com esta análise foi obtida a dependência do tempo de residência pela vazão de entrada, esta dependência é uma exponencial.

A análise do perfil vertical de temperatura mostrou um comportamento similar a uma lagoa real e também a influência da configuração no perfil vertical, pois na configuração livre onde a formação de grandes regiões de recirculações o comportamento do perfil foi mais irregular ao contrário das configurações S e U onde o escoamento é bem definido e as recirculações são menos intensas que na configuração livre.

Outro aspecto das curvas do perfil vertical é que estas mostram claramente a influência do processo de evaporação pela abrupta queda de temperatura que se observa em uma profundidade a partir de 10 mm da

superfície, este tipo de informação normalmente não é apresentado nos estudos de lagoas de resfriamento, embora pode ser medido e avaliado.

Na análise da temperatura ao longo do escoamento verificou-se que quase sempre tem-se uma curva com uma queda de temperatura mais acentuada campo próximo a saída, onde a diferença de temperatura entre a água e o ar é mais acentuada, já num campo distante ficou menos acentuada, isto é uma característica apresentada pelas lagoas de resfriamento, mostrando que o modelo possui propriedades comuns as lagoas.

Na configuração livre pode-se visualizar o campo de temperaturas em diferentes níveis de profundidade para as diferentes indicando onde ocorrem recirculações e zonas mortas. No regime transiente através das isothermas pode-se visualizar como a pluma térmica escoar para dentro do modelo nos sucessivos instantes.

Nos escoamentos superficiais das configurações livre e S observa-se as recirculações do escoamento e é importante notar que na configuração livre esta recirculação é maior devido a ausência das chicanas. As posições destas recirculações coincidem com as regiões as mesmas observadas nas isothermas superficiais (2mm). O escoamento superficial é fortemente influenciado pelas correntes de densidades causadas pelo gradiente de temperatura. Na configuração S observa-se que ocorrem recirculações em todas as subdivisões limitadas pelas chicanas.

No escoamento de fundo foi utilizado cristais solúveis em água que originaram plumas coloridas que permaneceram próximas ao fundo, o movimento destas plumas indicavam o sentido do escoamento de fundo. O que observou-se ao contrário do previsto é que mesmo em uma lamina d'água pequena (2,5 cm), ocorreu um escoamento em sentido contrário a saída do



modelo como em uma célula de recirculação vertical verificada em lagoas reais. Foi observado que este escoamento de fundo ocorre em uma camada de aproximadamente 3mm.

Com as medidas da temperatura foi possível avaliar a perda de calor superficial. Isto mostrou que para vazões menores a configuração livre é mais eficiente que as demais, já na vazão alta a configuração U tem melhor eficiência.

Nos cálculos do número de Ponde, claramente que o modelo se enquadra em uma lagoa de resfriamento rasa parcialmente misturada, já o gradiente normalizado é baixo devido ao fato do modelo possuir uma profundidade possuindo uma pequena variação vertical de temperatura.

De modo geral o uso de instrumentação automática de medidas em um modelo reduzido possibilitou o levantamento de características do modelo que se mostrou com comportamento similar ao observado nas lagoas reais ou em modelos de dimensões maiores. O uso de modelos reduzidos tem a vantagem do custo além de um melhor controle das condições ambientais.

## 7.0 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser analisado com mais variáveis já que a instrumentação de medidas esta desenvolvida.

Uma proposta seria a variação da temperatura de entrada utilizando um sistema de aquecimento mais eficaz quanto ao controle da temperatura.

Também pode-se por meio de um conjunto de lâmpadas simular a influência da radiação já que esta variável não foi avaliada no trabalho.

A indução de vento também é possível por meio de jatos de ar dirigidos tangencialmente a superfície do modelo.

Um outro estudo seria verificar o comportamento do modelo quanto a profundidade para avaliar quando o modelo passaria a representar uma lagoa de características profunda.

Em trabalho de campo poderia ser desenvolvidos protótipos de medidas dotados de circuitos de medidas bateria, células solares e transmissor para enviar os dados para uma central de recepção, que ao invés de fios utilizaria ondas de rádio na transmissão.

De modo geral este trabalho pode tem vários caminhos para sua continuidade que contribuiriam para um estudo mais completo de modelos reduzidos.

## 8.0. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RYAN, P. J., HARLEMAN, D. R. H. *An analytical and experimental study of transient cooling pond behavior* Tech. Rep., n. 161 R. M. Parsons Lab. For Water Resources and Hydrodyn.. Mass. Inst. of Technol., Cambridge, Jan. 1973.
- [2] RYAN, P. J. Surface heat loss from cooling ponds. *Water Resources Research*, v. 10, n. 5, p. 930, Oct. 1974.
- [3] BOWEN, I. E. Ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, v. 12, p. 779, Jun 1926.
- [4] JIRKA, G. H. et alii, *Mathematical predictive models for cooling lakes and ponds. Part A: Model development and design considerations.* Tech. Rep. n° 238, R. M. Parsons Lab. For Water Resources and Hydrodyn.. Mass. Inst. of Technol., Cambridge, Dez. 1978.
- [5] RAPHAEL, J.,M., Prediction of temperature in river and reservoir. *Journal of Power Division PO2*, pg. 157, jul. 1962
- [6 ] JOBSON, H. E. The dissipation of excess heat from water systems. *Journal of Power Division PO1*, p. 89, May 1973,.
- [7] ORLOB, G., T., *Mathematical Modeling of Water Streams, Lakes and Reservoirs.* John Wiliey & Sons, 1983.
- [8] EDINGER, J. E. The response of water temperatures to meteorological conditions. *Water Resourse Research*, v. 4, n. 5, p. 1137, Oct. 1968.

- [9] CERCO, C. F. *Experimental and analytical study of design of shallow cooling ponds*. Thesis present to M T I, in 1977, in partial fulfillment of the requirements for degree of master of science.
- [10] JIRKA, G. H. Cooling impoundments: classification and analysis. *Journal of Energy Division EY2*, p. 291, Aug. 1979
- [11] JIRKA, G. H., WATANABE, M., Thermal structure of cooling ponds. *Journal of Hydraulics Division HY5* May, p. 701, 1980.
- [12] JAIN, C., S., Density currents in sidearms of cooling pond. *Journal of Energy Division EY1* Apr, pag 9, 1980.
- [13] YEH, G. T. Understead temperature prediction for cooling ponds. *Water Resources Research*, v. 9, n. 6, p. 1555, 1973.
- [14] HARLEMAN, D. R. F. Heat disposal in water environment. *Journal of Hydraulics Division HY9*, p. 1120, Sep. 1975.
- [15] TRACSON, E., L., PAKER, F., L., Geographical influence of cooling ponds. *Journal WPCF*, Vol 44, n°7 Jul, pg. 1334, 1972.
- [16] EDINGER, J., E., The response of water temperature to meteorological conditions. *Water Resources Research*, vol 4, n°4, Out. pg. 1137, 1968.
- [17] DRIZIRIUS, M., R. Vertical Turbulent Transport Longitudinal Dissipation of heat in cooling ponds. *Heat Transfer Soviet Research*, Vol 23, n°3, pg. 394, 1991.

- [18] BADDOUR, R., E. Stratified cooling channel for thermal discharges. *Journal of Environmental Engineering*. Vol 120, n°1 Jan. pg. 243, 1994.
- [19] RUIJTER, W., P., M. Effects of velocity shear in advective mixed-layers models. *Journal Of Physics Oceanography*, Vol 13, Sept, pg.1589, 1983.
- [20] TICHENOR, B., A. Cooling Pond Temperature Versus Size and Water Loss. *Journal of Power Division PO3*, Jul. pg. 589, 1971.
- [21] *Teoria , Projeto e Aferição de pares Termo-elétricos*. Laboratório de Aeronaves - USP - São Carlos, 1975.
- [22] ADAMS E., E. Transient Analysis for Shallow Cooling Ponds. *Journal of Energy Division EY2*, Oct. pg.141, 1980.
- [23] FREYMUTH, P. Flow Visualization in Fluids Mechanics. *Rev. Sci. Instrum.* n°64, Jan, pg 1, 1993.
- [24] WATANABE, M., and HARLEMAN, D., R., F. A Model of Stable Stratified Cooling Pond. International Association for Hydraulic Research.
- [25] JIRKA, G. and HARLEMAN, D., R., F. Efficient Cooling Ponds: Classification. *Journal of Hydraulics Division HY11*, Nov. pg 1547, 1981
- [26] JIRKA, G. H. Efficient cooling ponds: design. *Journal of Hydraulics Division HY11*, p. 701, Nov. 1981,.
- [27] JIRKA, G. H. Steady-state estimation of cooling pond performance. *Journal of Hydraulics Division HY6*, p. 1547, Jun. 1980.

**ANEXO**

```

uses crt;
(=====)
{  DECLARACAO DE CONSTANTES  }
Const
    MAXMED =24;          ( Nro de coletas para realizar a media. )
    NPTOS =100;         ( Nro de pontos que serao coletados. )
    SEGUNDO = 1000;

(=====)
{  DECLARACAO DE TIPOS  }
Type
    vet = array[0..MAXMED+4] of real;
    vetint = array[0..MAXMED+4] of integer;

    argreal = FILE OF real;

(=====)
{  VARIAVEIS GLOBAIS  }
Var
    ind,
    j ,
    aux,
    P,
    nioops,
    intervalo,
    tempo,
    k      : integer;

    volt,
    temp,
    vari   : real;

    vet1,
    vet2   : vetint;

    tensoes : vet;

    arq : argreal;

    arq2 : text;
    arq1 : FILE OF real;

    loop : string[4];
    stri : string[5];
    nomearq,
    nome : string[8];
    argesc : string[12];

(=====)
{  SUBROTINAS  }

(=====)
{  CONVERTE  }
{ Esta rotina converte um arquivo de dados binarios em um arquivo texto. }

Procedure Converte;
Var arqleit : string[12];
Begin
    assign(arq1 ,argesc);
    arqleit := Concat(nome, '.txt');
    assign(arq2 ,arqleit);

```

```

gotoxy(42,8);
readln(nloops);
gotoxy(8,10);
write('QUAL O INTERVALO DE TEMPO (EM SEGUNDOS) ENTRE CADA');
gotoxy(8,12);
write('CONJUNTO DE COLETAS ?      SEGUNDOS');
gotoxy(30,12);
readln(intervalo);
gotoxy(18,18);
clrscr;
gotoxy(5,18);
write('ENTRE COM O NOME DO ARQUIVO ONDE VAI ARMAZENAR OS DADOS');
readln(nomearg);
clrscr;
write('PARA INICIAR TECLE UMA TECLA');
gotoxy(1,19);
readln;
clrscr;
end;

```

```
{== == == == == == == == == == == == == == == == == == == == == == ==}
```

```
{          PROGRAMA PRINCIPAL          }
```

```

Begin
  { ClrScr; }
  ENTRATELA;

  for p:=1 to nloops do

    begin
      str(p,loop);
      nome:=concat(nomearg,loop);
      argesc := Concat(nome, '.dat');
      Assign(arg,argesc);
      rewrite(arg);

      port[562] := 255;
      delay(1);
      port[562] :=10;
      delay(1);

      For ind := 0 To NPTOS-1 Do
        Begin
          volt := 0;
          temp := 0;

          WriteLn;
          volt := coleta;
          temp := 100*volt;
          write(arg,temp);
          write( 'termopar ', ind, ' ');
          Write( 'Voltagem ',volt:2:2, ' volts');
          Write( ' --',ind,' Temperatura ',temp:2:1);

          port[561] :=255;
          delay(1);
          port[561] := 10;          { Envia 0 V para desabilitar a leitura.}

        End;
      writeln;
      writeln;
      write('Coleta ',p,' de um total de ',nloops, ' : intervalo de ',intervalo,' seg');
      writeln;
      Close(arg);
    end;

```



```
Converte;  
for k:=0 to intervalo-1 do  
begin  
  DELAY(segundo);  
end;  
end;  
readln;  
end.
```