

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

## **Estudo Sobre Piscina Solar**

Autor: **José Clet Brito**

Orientador: **Prof. Dr. Kamal A.R. Ismail**

12/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

## **Estudo Sobre Piscina Solar**

Autor: **José Clet Brito**

Orientador: **Prof. Dr. Kamal A.R. Ismail**

Curso: **Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Instrumentação e Controle Industrial**

Trabalho Final de Mestrado Profissional apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia Mecânica/Instrumentação e Controle Industrial.

Campinas, 23 de março de 2006

MA-Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -  
UNICAMP

B777e Brito, José Clet  
Estudo sobre piscina solar / José Clet Brito. --  
Campinas, SP: [s.n.], 2006

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail  
Dissertação (mestrado profissional) - Universidade  
Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia  
Mecânica.

1. Energia solar. 2. Energia solar térmica. 3.  
Radiação solar. 4. Geração de energia fotovoltaica. I.  
Ismail, Kamal Abdel Radi. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.  
Título.

Título em Inglês: Study on solar pool

Palavras-chave em Inglês: Solar pool, Solar energy, Termoconversion

Área de concentração: Instrumentação e Controle Industrial

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Waldemir Silva e Lima e Valdemar Silva Leal

Data da defesa: 23/03/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Trabalho Final de Mestrado Profissional**

**Estudo Sobre Piscina Solar**

Autor: **José Clet Brito**

Orientador: **Prof. Dr. Kamal A.R. Ismail**

---

**Prof. Dr. Kamal A.R. Ismail – UNICAMP**

---

**Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima – UEMA**

---

**Prof. Dr. Valdemar Silva Leal – UEMA**

Campinas, 23 de março de 2006

## **Dedicatória**

A toda minha família e em especial à minha querida esposa Francisca de Sousa Brito.

Aos meus pais(*in memorian*).

Ao Prof. Marcus Venícius Martins de Oliveira(*in memorian*)

## **Agradecimentos**

À DEUS, pai do Universo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Kamal A.R. Ismail, pelas suas contribuições, além da paciência e honestidade no relacionamento ao longo deste trabalho.

Ao Prof. e amigo Francisco de Assis Miranda Filho, pela sua grande contribuição, na liberação (empréstimo) do equipamento (Termômetro digital e acessórios) do CEFET-MA; sem a qual, não seria possível a realização deste trabalho.

Ao meu querido filho Franclet de Sousa Brito, por ter colaborado bastante comigo na digitação e formatação deste trabalho.

Ao Prof. amigo e companheiro Joaquim Teixeira Lopes, por estarmos sempre trocando idéias a respeito de Energia Solar.

A todos os professores e colegas Administrativos e em especial José Magno Silva do Departamento de Física da UEMA que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Weilleton de Assunção do NUTENGE da UEMA por ter cedido sua sala para guardar todo material de apoio da piscina solar.

Ao Curso de Pós-Graduação da UNICAMP, em propiciar este Mestrado em parceria com a UEMA.

*Os que confiam no Senhor serão como o monte de Sião, que não se abala, mas permanece para sempre. Assim como estão os montes à roda de Jerusalém, assim o Senhor está em volta do seu povo desde agora e para sempre. Porque o cetro da impiedade não permanecerá sobre a sorte dos justos, para que o justo não estenda as suas mãos para a iniquidade. Faze bem, ó Senhor, aos bons e aos que são retos de coração. Quanto àqueles que se desviam para os seus caminhos tortuosos, levá-los ao Senhor com os que praticam a maldade; paz haverá sobre Israel.*

#### **SALMO 125**

## Resumo

BRITO, José Clet. Estudo Sobre Piscina Solar,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 152 p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

Neste trabalho apresentamos um estudo sobre piscina solar, como retentora de energia térmica, para futura transformação em energia elétrica, sendo esta constituída por 03 camadas de água salgada com gradientes de densidades diferentes e em ordem crescente de cima para baixo, fazendo com que obtivéssemos 03 temperaturas também em ordem crescente. Fizemos o seu monitoramento durante onze dias, e os dados obtidos nos ensaios permitiram uma análise das diferenças entre as temperaturas final e inicial, da zona de armazenamento, zona intermediária, zona de superfície e o rendimento ao longo dos onze dias no intervalo de tempo das 8:00h. às 17:00h., conforme mostra as tabelas 4.1 a 4.12. A apresentação dos resultados em forma de gráfico é muito importante, pois permite extrair com mais realidade os parâmetros que descrevem, de forma simples, o comportamento da piscina solar de gradiente salino. As variações de temperatura de cada zona, para melhor visualização gráfica, são apresentadas nos gráficos 4.1 a 4.11, sendo nas ordenadas as temperaturas médias e nas abscissas os tempos. E, no gráfico 4.12, o rendimento em função da temperatura média. Após a realização dos ensaios, os pontos foram plotados, gerando os gráficos 4.1 a 4.12. Utilizamos o valor médio diário da radiação solar incidente, como sendo  $837,34\text{W/m}^2$ , segundo dados da Tese de Mestrado de LOPES, (2004), para latitude de  $2,55^\circ$  em relação a linha do equador em São Luís do Maranhão e a potência total disponível de  $164,41\text{W}$ . Os dados experimentais informam que a temperatura máxima da zona de armazenamento foi obtido no 2º ensaio, correspondendo a  $45^\circ\text{C}$  e sua eficiência máxima de  $13,09\%$ , obtido no 5º ensaio, com intervalo de confiabilidade, respectivamente iguais a  $[4,26 ; 8,26]\%$  e  $[5,16 ; 6,32]^\circ\text{C}$ , conforme demonstrativo nos apêndices: D.2.10.2 e D.5.8.2.

Palavras-chave:

Piscina solar, Energia solar, Termoconversão.

## Abstract

BRITO, Jose Clet. Study On Solar Pool. College of Engineering Mechanics. State University of Campinas, 2006. 152 p. Final Trabalho of Professional Mestrado.

In this work we present a study on solar swimming pool, as retainer of thermal energy, for future transformation in electric energy, being this consisting by 03 salty with gradients of different densities and orderly water layers increasing from top to bottom, making with that we also got 03 temperatures orderly increasing. We made its monitoramento during eleven days, and the data gotten in the assays had allowed an analysis of the differences between the temperatures final and initial, of the zone of storage, intermediate zone, zone of surface and the income to the long one of the eleven days in the interval of time of 8:00h. to 17:00h., as it shows to tables 4,1 the 4.12. The presentation of the results in graph form is very important, therefore it allows to extract with more reality the parameters that they describe, of simple form, the behavior of the solar swimming pool of saline gradient. The variations of temperature of each zone, for better graphical visualization, are presented in graphs 4,1 the 4,11, being in commanded the average temperatures and the abscissas the times. E, in the graph 4,12, the income in function of the average temperature. After the accomplishment of the assays, the points had been located, generating graphs 4,1 the 4.12. We use the daily average value of the incident solar radiation, as being  $837,34\text{W/m}^2$ , according to data of the Thesis of Mestrado of LOPES, (2004), for latitude of  $2,55^\circ$  in relation the line of the equator in São Luís of the Maranhão and the available total power of  $164,41\text{W}$ . The experimental data inform that the maximum temperature of the storage zone was gotten in 2° assay, corresponding  $45^\circ\text{C}$  and its maximum efficiency of  $13,09\%$ , gotten in 5° assay, with trustworthiness interval, respectively equal  $[4,26; 8,26]\%$  and  $[5,16; 6,32]^\circ\text{C}$ , as demonstrative in the appendices: D.2.10.2 and D.5.8.2.

Key Words:

Solar pool, Solar energy, Termoconversion.

## Sumário

|                                                                                    |             |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                                            | <b>xi</b>   |
| <b>Lista de Gráficos</b>                                                           | <b>xiii</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                                            | <b>xiv</b>  |
| <b>Nomenclatura</b>                                                                | <b>xv</b>   |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>                                                     | <b>1</b>    |
| <b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                          | <b>4</b>    |
| 2.1 Estudo de algumas piscinas solares                                             | 4           |
| 2.2 Energia Solar                                                                  | 5           |
| 2.3 Radiação solar ou radiação em ondas curtas                                     | 7           |
| 2.4 Radiação solar extraterrestre                                                  | 8           |
| 2.5 Variação da radiação solar extraterrestre ao longo do ano                      | 8           |
| 2.6 Radiação solar direta e difusa                                                 | 9           |
| 2.7 Radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal                  | 10          |
| 2.8 Radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada na superfície da terra | 11          |
| 2.9 Formas de coletar energia solar                                                | 13          |
| 2.10 Piscina solar de gradiente salino                                             | 15          |
| 2.10.1 Classificação das piscinas solares                                          | 16          |
| 2.10.1.1 Piscina solar convectiva                                                  | 16          |
| 2.10.1.2 Piscina solar não convectiva                                              | 16          |
| 2.11 Princípio físico de uma piscina solar                                         | 16          |
| 2.12 As três zonas de convecção de uma piscina solar                               | 17          |
| 2.13 Origem das camadas convectivas                                                | 18          |
| 2.14 A escolha do sal                                                              | 19          |
| 2.15 Gráfico da solubilidade de alguns sais comuns em função da temperatura        | 19          |
| 2.16 Condição de estabilidade de uma piscina solar                                 | 19          |
| 2.17 Difusão do sal                                                                | 21          |

|                                                       |                                                                                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.18                                                  | Absorção e percurso da radiação solar                                                                                                                                                   | 21        |
| 2.19                                                  | Modelo matemático                                                                                                                                                                       | 24        |
| 2.20                                                  | Hipóteses                                                                                                                                                                               | 25        |
| 2.21                                                  | Equacionamentos                                                                                                                                                                         | 25        |
| 2.22                                                  | Determinação de $C_1$                                                                                                                                                                   | 28        |
| 2.23                                                  | Temperatura da ZCI                                                                                                                                                                      | 28        |
| 2.24                                                  | Rendimento térmico ( $\eta_t$ )                                                                                                                                                         | 29        |
| 2.25                                                  | Equacionamento básico para o estudo experimental                                                                                                                                        | 30        |
| 2.25.1                                                | Energia Útil ( $Q_u$ )                                                                                                                                                                  | 30        |
| 2.25.2                                                | Coeficiente global da transmissão de calor ( $U$ )                                                                                                                                      | 30        |
| 2.25.3                                                | Rendimento equivalente médio ( $\eta$ )                                                                                                                                                 | 31        |
| <b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS</b> |                                                                                                                                                                                         | <b>32</b> |
| 3.1                                                   | Metodologia - piscina solar                                                                                                                                                             | 32        |
| 3.1.1                                                 | Construção do reservatório                                                                                                                                                              | 33        |
| 3.1.2                                                 | Determinação teórica e prática do volume da quantidade de solvente (água doce) de cada camada                                                                                           | 35        |
| 3.1.3                                                 | Determinação teórica e prática da quantidade de massa do soluto (Cloreto de Sódio = NaCl) que foi utilizado em cada camada                                                              | 37        |
| 3.1.4                                                 | Determinação da massa do solvente (água doce) das 03 camadas                                                                                                                            | 37        |
| 3.1.5                                                 | Determinação da titulação de cada zona                                                                                                                                                  | 38        |
| 3.2                                                   | Preparação de cada solução                                                                                                                                                              | 38        |
| 3.3                                                   | Determinação da vazão com que a 2ª camada é colocada sobre a 1ª e a 3ª sobre a 2ª assim como também os seus respectivos intervalos de tempo líquido gasto pelo método teórico e prático | 39        |
| 3.4                                                   | Enchimento da piscina                                                                                                                                                                   | 40        |
| 3.4.1                                                 | Colocação da 1ª camada                                                                                                                                                                  | 41        |
| 3.4.2                                                 | Colocação da 2ª e 3ª camada                                                                                                                                                             | 41        |
| 3.5                                                   | Monitoramento da temperatura média de cada camada e também da temperatura ambiente                                                                                                      | 43        |

|                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES</b>         | <b>46</b>  |
| 4.1 1º Ensaio da piscina solar                                  | 46         |
| 4.2 2º Ensaio da piscina solar                                  | 47         |
| 4.3 3º Ensaio da piscina solar                                  | 48         |
| 4.4 4º Ensaio da piscina solar                                  | 49         |
| 4.5 5º Ensaio da piscina solar                                  | 50         |
| 4.6 6º Ensaio da piscina solar                                  | 51         |
| 4.7 7º Ensaio da piscina solar                                  | 52         |
| 4.8 8º Ensaio da piscina solar                                  | 53         |
| 4.9 9º Ensaio da piscina solar                                  | 54         |
| 4.10 10º Ensaio da piscina solar                                | 55         |
| 4.11 11º Ensaio da piscina solar                                | 56         |
| 4.12 Temperaturas e rendimentos médios dos onze ensaios         | 57         |
| <b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> | <b>59</b>  |
| <b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>                                 | <b>150</b> |

## Lista de Figuras

|             |                                                                        |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1  | Modelo de geração de energia elétrica utilizando a piscina solar       | 3  |
| Figura 2.1  | Coletor solar de placa plana                                           | 14 |
| Figura 2.2  | Representação da piscina solar e suas respectivas camadas              | 15 |
| Figura 2.3  | Ocasões anuais no hemisfério sul                                       | 23 |
| Figura 2.4  | Modelo matemático para análise da piscina solar em estado estacionário | 24 |
| Figura 3.1  | Dimensões padronizadas pela casa de pré-moldados                       | 33 |
| Figura 3.2  | Dimensões da piscina solar e suas respectivas camadas                  | 34 |
| Figura 3.3  | Piscina solar sobre a sapata de alvenaria                              | 35 |
| Figura 3.4a | Colocação de água no Becker                                            | 36 |
| Figura 3.4b | Colocação de água na proveta                                           | 36 |
| Figura 3.5  | Pesagem do soluto (NaCl) de cada zona                                  | 37 |
| Figura 3.6  | Preparação da solução de NaCl em água                                  | 38 |
| Figura 3.7  | Determinação da vazão                                                  | 40 |
| Figura 3.8  | Colocação da 1ª camada                                                 | 41 |
| Figura 3.9  | Colocação do sistema balde dependurado pela polia fixa                 | 42 |
| Figura 3.10 | Colocação da 2ª solução no balde através de um Becker                  | 42 |
| Figura 3.11 | Medição da 1ª camada                                                   | 44 |
| Figura 3.12 | Medição da 2ª camada                                                   | 44 |
| Figura 3.13 | Medição da 3ª camada                                                   | 45 |
| Figura 3.14 | Utilização da planilha para registro dos dados                         | 45 |
| Figura 4.1  | Gráfico do 1º ensaio da piscina solar                                  | 47 |
| Figura 4.2  | Gráfico do 2º ensaio da piscina solar                                  | 48 |
| Figura 4.3  | Gráfico do 3º ensaio da piscina solar                                  | 49 |
| Figura 4.4  | Gráfico do 4º ensaio da piscina solar                                  | 50 |
| Figura 4.5  | Gráfico do 5º ensaio da piscina solar                                  | 51 |
| Figura 4.6  | Gráfico do 6º ensaio da piscina solar                                  | 52 |

|             |                                                                                    |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.7  | Gráfico do 7º ensaio da piscina solar                                              | 53 |
| Figura 4.8  | Gráfico do 8º ensaio da piscina                                                    | 54 |
| Figura 4.9  | Gráfico do 9º ensaio da piscina solar                                              | 55 |
| Figura 4.10 | Gráfico do 10º ensaio da piscina solar                                             | 56 |
| Figura 4.11 | Gráfico do 11º ensaio da piscina solar                                             | 57 |
| Figura 4.12 | Gráfico dos rendimentos médios em função das temperaturas<br>médias dos 11 ensaios | 58 |

## Lista de Gráficos

|              |                                                                                                                                     |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 2.1  | Distribuição espectral da radiação solar extraterrestre, da variação solar ao nível do mar e da radiação de um corpo negro a 5.800K | 7  |
| Gráfico 2.2  | Variação da radiação solar extraterrestre ao longo do ano                                                                           | 9  |
| Gráfico 2.3a | Perfil da temperatura em função da profundidade                                                                                     | 17 |
| Gráfico 2.3b | Perfil da temperatura em função da profundidade                                                                                     | 18 |
| Gráfico 2.4  | Solubilidade de alguns sais comuns em função da temperatura                                                                         | 19 |
| Gráfico 2.5  | Ilustração da refração da luz                                                                                                       | 22 |

## Lista de Tabelas

|             |                                                           |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1  | Tabela dos Coeficiente de $F_1$ e $F_2$                   | 13 |
| Tabela 4.1  | Tabela do 1º ensaio da piscina solar                      | 46 |
| Tabela 4.2  | Tabela do 2º ensaio da piscina solar                      | 47 |
| Tabela 4.3  | Tabela do 3º ensaio da piscina solar                      | 48 |
| Tabela 4.4  | Tabela do 4º ensaio da piscina solar                      | 49 |
| Tabela 4.5  | Tabela do 5º ensaio da piscina solar                      | 50 |
| Tabela 4.6  | Tabela do 6º ensaio da piscina solar                      | 51 |
| Tabela 4.7  | Tabela do 7º ensaio da piscina solar                      | 52 |
| Tabela 4.8  | Tabela do 8º ensaio da piscina solar                      | 53 |
| Tabela 4.9  | Tabela do 9º ensaio da piscina solar                      | 54 |
| Tabela 4.10 | Tabela do 10º ensaio da piscina solar                     | 55 |
| Tabela 4.11 | Tabela do 11º ensaio da piscina solar                     | 56 |
| Tabela 4.12 | Tabela do rendimento em função da variação de temperatura | 57 |

## Nomenclatura

|                                 |   |                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a                               | – | Constante igual a 0,36                                                                                                                                                                         |
| A                               | – | Constante igual a $5,553.10^{-1}$                                                                                                                                                              |
| A <sub>o</sub>                  | – | Área do orifício de escoamento                                                                                                                                                                 |
| ASTM                            | – | American Society of Testing and Materials                                                                                                                                                      |
| A'                              | – | Área da secção transversal da piscina solar, sendo igual a 1963,4475 cm <sup>2</sup> = $1963,4475.10^{-4} \text{ m}^2 = 0,19634475 \text{ m}^2$                                                |
| b                               | – | Constante igual a 0,08                                                                                                                                                                         |
| B                               | – | Constante igual a $-8,13.10^{-5}$                                                                                                                                                              |
| B'                              | – | $360.(n - 81) / 365$                                                                                                                                                                           |
| C                               | – | Constante igual a $8.10^{-4}$                                                                                                                                                                  |
| C <sub>1</sub> e C <sub>2</sub> | – | Constante de integração                                                                                                                                                                        |
| cos                             | – | Cosseno                                                                                                                                                                                        |
| c <sub>p</sub>                  | – | Calor específico da solução de cloreto de sódio da zona de armazenamento à pressão constante, com uma titulação de 20%, sendo igual a 0,854 cal / g.°C = 3,57484 J / g.°C, segundo SOUZA, 2005 |
| d                               | – | Altura da zona intermediária ou da ZNC                                                                                                                                                         |
| D <sub>c</sub>                  | – | Espessura do fundo de concreto                                                                                                                                                                 |
| D <sub>c</sub> /K <sub>c</sub>  | – | Resistência térmica do concreto                                                                                                                                                                |
| D <sub>ex</sub>                 | – | Diâmetro externo da caixa utilizada igual a 54 cm                                                                                                                                              |
| D <sub>i</sub>                  | – | Diâmetro interno da caixa utilizada igual a 50 cm                                                                                                                                              |
| D <sub>o</sub>                  | – | Diâmetro do orifício                                                                                                                                                                           |
| D <sub>s</sub>                  | – | Profundidade do fundo da piscina                                                                                                                                                               |
| D <sub>s</sub> /K' <sub>s</sub> | – | Resistência térmica do solo                                                                                                                                                                    |
| e                               | – | Espessura da caixa utilizada igual a 4 cm                                                                                                                                                      |
| E                               | – | $9,87.\text{sen}(2.B') - 7,53.\text{cos}(B') - 1,5.\text{sen}(B')$                                                                                                                             |
| E <sub>i</sub>                  | – | Extremidade inferior                                                                                                                                                                           |

|              |   |                                                                                                                                                                                              |
|--------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_s$        | – | Extremidade superior                                                                                                                                                                         |
| $F_{ij}$     | – | Coefficiente                                                                                                                                                                                 |
| $G_{SC}$     | – | Constante solar igual a $1367 \text{ W/m}^2$                                                                                                                                                 |
| $G_T$        | – | Radiação solar extraterrestre                                                                                                                                                                |
| $h'$         | – | Altura padrão da caixa utilizada igual a 50 cm                                                                                                                                               |
| $h$          | – | Fração da energia solar incidente após o percurso $y$ ou pode ser também chamado de altura                                                                                                   |
| $H$          | – | Média anual do fluxo de radiação solar                                                                                                                                                       |
| $H_0$        | – | Energia da radiação solar extraterrestre                                                                                                                                                     |
| $h_d$        | – | Fração da radiação incidente que chega a uma profundidade $d$                                                                                                                                |
| $h_n$        | – | Altura interna da piscina ou da caixa utilizada igual a 23 cm                                                                                                                                |
| $H_p$        | – | Fluxo da radiação solar médio diário de São Luís do Maranhão que incide na superfície da piscina solar, sendo igual a $837,34 \text{ W / m}^2$ , segundo a tese de mestrado de LOPES, (2004) |
| $h_{za}$     | – | Altura da zona de armazenamento                                                                                                                                                              |
| $h_{zi}$     | – | Altura da zona intermediária                                                                                                                                                                 |
| $h_{zs}$     | – | Altura da zona de superfície                                                                                                                                                                 |
| $I_0$        | – | Irradiância extraterrestre                                                                                                                                                                   |
| $I_b$        | – | Intensidade da radiação direta em uma superfície horizontal                                                                                                                                  |
| $I_{conf}$   | – | Intervalo de confiança ou de confiabilidade                                                                                                                                                  |
| $I_d$        | – | Intensidade da radiação difusa                                                                                                                                                               |
| $I_{d\beta}$ | – | Radiância uniforme sobre todo o céu                                                                                                                                                          |
| $\ln$        | – | Logaritmo natural                                                                                                                                                                            |
| $I_t$        | – | Intensidade da radiação total na superfície inclinada                                                                                                                                        |
| $k_c$        | – | Condutividade térmica do concreto                                                                                                                                                            |
| $k_s$        | – | Coefficiente de difusão do sal                                                                                                                                                               |
| $k'$         | – | Condutividade térmica do solo                                                                                                                                                                |
| $k_{sl}$     | – | Condutividade térmica da solução                                                                                                                                                             |
| $k_T$        | – | Coefficiente de difusão da temperatura                                                                                                                                                       |

|                                 |   |                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_l$                           | – | Longitude do local em questão, em graus oeste                                                                                                                     |
| $L_r$                           | – | Meridiano de estabilidade como referência para a região horária                                                                                                   |
| $m$                             | – | Massa de ar                                                                                                                                                       |
| $m_{\text{solute}}$             | – | Massa do soluto                                                                                                                                                   |
| $m_{\text{solvente}}$           | – | Massa do solvente                                                                                                                                                 |
| $m'$                            | – | Massa da solução de cloreto de sódio da zona de armazenamento =<br>$m_{\text{solute}} + m_{\text{solvente}} = 2710,0\text{g} + 13541,2\text{g} = 16251,2\text{g}$ |
| $n$                             | – | número de dia do ano que varia de 1 até 365                                                                                                                       |
| NASA                            | – | National Aeronautics and Space Administration                                                                                                                     |
| $P_u$                           | – | Potência útil                                                                                                                                                     |
| $P_t$                           | – | Potência total                                                                                                                                                    |
| $q$                             | – | Fluxo de sal que difunde para a superfície                                                                                                                        |
| $Q$                             | – | Taxa de energia extraída do fundo da piscina ou pode ser também vazão                                                                                             |
| $Q_f$                           | – | Perdas que ocorrem no fundo da piscina                                                                                                                            |
| $Q_t$                           | – | Energia total                                                                                                                                                     |
| $Q_u$                           | – | Energia útil                                                                                                                                                      |
| $R_b$                           | – | Razão entre a intensidade da radiação direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade da radiação direta sobre uma superfície horizontal                    |
| $S$                             | – | Concentração salina                                                                                                                                               |
| $\text{sen}$                    | – | Seno                                                                                                                                                              |
| SERPYP                          | – | Quantidade de energia solar recebida na atmosfera externa por ano                                                                                                 |
| $\frac{\partial S}{\partial x}$ | – | Derivada da concentração salina em relação à profundidade                                                                                                         |
| $\frac{\partial S}{\partial T}$ | – | Derivada parcial da concentração salina em relação à temperatura                                                                                                  |
| $\frac{\partial S}{\partial x}$ | – | Derivada parcial da concentração salina em relação à profundidade                                                                                                 |

|                     |                                                                                                                               |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T                   | – Temperatura                                                                                                                 |
| $\Delta t$          | – Intervalo de tempo do monitoramento da piscina solar, sendo igual a<br>$17h - 8h = 9h = 9.3600s = 32400s$                   |
| $\Delta T$          | – Variação de temperatura da zona de armazenamento, durante o<br>intervalo de tempo de seu monitoramento                      |
| $\frac{dT}{dx}$     | – Derivada da temperatura em relação à profundidade                                                                           |
| $\frac{d^2T}{dx^2}$ | – Derivada segunda da temperatura em relação à profundidade                                                                   |
| U                   | – Coeficiente Global de Transmissão de Calor                                                                                  |
| U.N.                | – União Nacional                                                                                                              |
| $\nu$               | – Viscosidade cinemática ou pode ser também velocidade de<br>escoamento da solução de NaCl                                    |
| V                   | – Volume de um cilindro                                                                                                       |
| $V_{za}$            | – Volume da zona de armazenamento                                                                                             |
| $V_{zi}$            | – Volume da zona intermediária                                                                                                |
| $V_{zs}$            | – Volume da zona de superfície                                                                                                |
| X                   | – Profundidade ou coordenada vertical, em metros, medida positiva a<br>partir da superfície da ZNC, como mostrou a figura 2.5 |
| WRC                 | – World Radiation Center                                                                                                      |
| Y                   | – Percurso de um raio solar de (luz visível) na água                                                                          |
| $y_0$               | – 90 m                                                                                                                        |
| $\alpha$            | – Ângulo de incidência                                                                                                        |
| $\beta$             | – Inclinação da superfície ou pode ser também chamado de ângulo de<br>refração                                                |
| $\delta$            | – ângulo de declinação, desvio ou ainda altura de superfície ou<br>espessura da camada limite                                 |
| $\Delta$            | – Incremento da radiação difusa em um disco em torno do sol                                                                   |
| $\nabla_\mu$        | – gradiente de densidade                                                                                                      |

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\eta$                             | – Eficiência ou rendimento térmico                                                                                                                                                                                                          |
| $\theta_d$                         | – Valor médio da temperatura final menos temperatura ambiente igual a $T_d - T_a()$ , no intervalo de tempo $\Delta t$                                                                                                                      |
| $\theta_s$ ou $\Delta S$           | – Declinação solar = É o ângulo formado pela reta que passa pelos centros do Sol e da Terra, com o plano do Equador, ao meio dia solar ( $-23,45^\circ < \Delta s < 23,45^\circ$ Norte positivo)                                            |
| $\theta_z$                         | – Ângulo zimute                                                                                                                                                                                                                             |
| $\frac{d\theta}{dx}$               | – Derivada do valor médio da temperatura final menos ambiente em relação à profundidade                                                                                                                                                     |
| $\mu$                              | – Densidade absoluta do solvente                                                                                                                                                                                                            |
| $\xi$                              | – Incremento da radiação difusa em uma banda do sol no horizonte                                                                                                                                                                            |
| $\rho$                             | – Pode ser chamado de albedo ou densidade absoluta                                                                                                                                                                                          |
| $\frac{d\rho}{dx}$                 | – Derivada da densidade em relação à profundidade                                                                                                                                                                                           |
| $\frac{\partial \rho}{\partial S}$ | – Derivada parcial da densidade em relação à concentração salina                                                                                                                                                                            |
| $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ | – Derivada parcial da densidade em relação à temperatura                                                                                                                                                                                    |
| $\tau$                             | – Titulação da solução                                                                                                                                                                                                                      |
| $\phi$                             | – Latitude geográfica ( $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ Sul negativo) ou pode ser também chamado de fluxo de energia solar, em $W/m^2$ , que atinge o ponto “x”                                                                               |
| $\frac{d\phi}{dx}$                 | – Derivada do fluxo de energia em relação à profundidade                                                                                                                                                                                    |
| $\omega$                           | – Ângulo horário = corresponde ao deslocamento do Sol a Leste ou a Oeste do Meridiano local, devido à rotação da Terra em torno do seu eixo, a $15^\circ$ por hora. Ao meio dia solar, corresponde a zero. Pela manhã e a tarde é positivo. |

- $\omega_s$  – ângulo horário ao pôr do sol
- 1,33 = índice de refração da água
- $\Gamma$  – Coeficiente de transmissão(perdas por reflexão)

# **CAPÍTULO I**

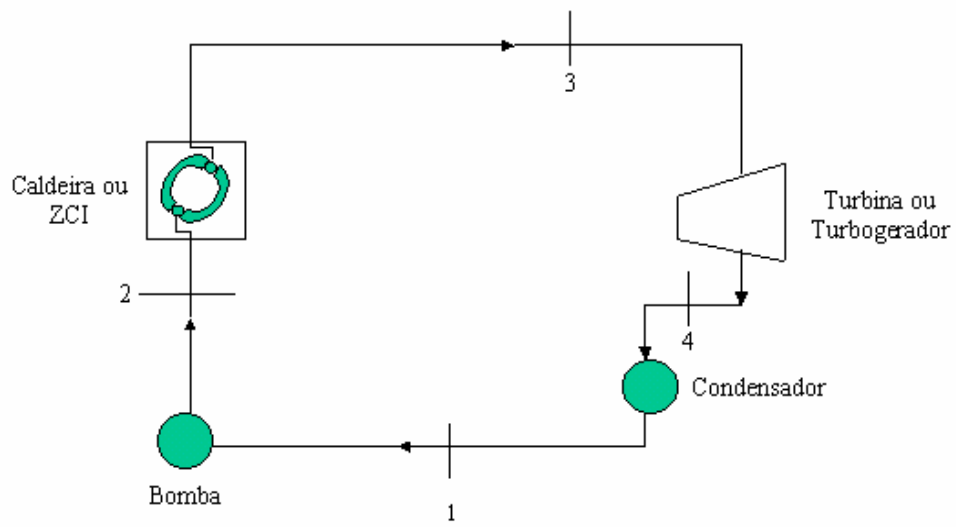
## **INTRODUÇÃO**

Um estudo abrangendo as diversas fontes energéticas disponíveis no planeta, suas utilizações e conseqüências, leva o ser humano a rever o seu desenvolvimento e repensar o futuro. Aborda e cria questões importantes para que a manutenção desta atmosfera evolutiva possa continuar e permitir um melhor aproveitamento das águas, do solo, do ar e do sol, em tempos, que se pode afirmar que a mudança de atitude em relação aos recursos energéticos mais conhecidos e empregados torna-se iminente. A utilização dos recursos fósseis, em escala maciça, só começou a se desenvolver a partir do século XIX, com o uso do carvão em 1820 e do petróleo em 1859, quando se encontrou, acidentalmente, uma jazida na Pensilvânia (EUA). Desde então, intensificou-se, sobremaneira, de forma que a atual matriz energética mundial dependa de quase 80% dos combustíveis fósseis REIS, (1998), cuja queima contribui para o aumento substancial das concentrações de gases que provocam o efeito estufa e as chuvas ácidas.

Atualmente, as fontes de energia não renováveis e renováveis são utilizadas, em sua maior parte, na produção da energia elétrica, e consideradas fontes primárias de energia. Com o estrangulamento do sistema energético vigente, a necessidade de soluções para a crise energética mundial, aliadas à racionalização do uso das energias ditas convencionais, em contrapartida com a abundância de energia solar disponível para o planeta Terra (energia limpa) e as inúmeras possibilidades de se compartilhar o seu uso com outras fontes energéticas, foram os principais elementos motivadores para as pesquisas do presente trabalho. Devido isto as piscinas solares aparecem, dessa forma, com funções múltiplas, podendo gerar energias diversas, além de corresponderem, muito bem, como armazenadoras de energia solar (térmica) nos períodos de sua ausência (período noturno). Para tanto, aborda-se a utilização de piscinas solares não convectivas. Com uma parte do milionésimo de energia solar que nosso país recebe durante o ano (aproximadamente 15 trilhões de megawatts), poderia nos dar um suprimento de energia equivalente a 54% do petróleo nacional ou 2 vezes a energia obtida com o carvão mineral ou ainda 4 vezes a

energia gerada no mesmo período por uma usina hidrelétrica BEZERRA, (1985). Devido a isto, cada 1 m<sup>2</sup> de uma piscina solar instalada evita-se a inundação de 56 m<sup>2</sup> de terras férteis, que poderiam ser utilizadas para agricultura e pecuária, assim como pode ser, perda de patrimônio histórico/cultural e também na recolocação de famílias, isto devido a construção de novas usinas hidrelétricas Grupo de Estudo Sobre Piscina Solar, Manual, p. 29-31, PUC-Minas Gerais, (2001).

Tendo em vista este novo momento em que retorna o interesse pelo uso da energia solar para o aquecimento de piscina solar de gradiente salino, entende-se que também o dimensionamento e a estratégia de utilização devam ser repensados. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre piscina solar como retentora de energia (térmica), em virtude da Ilha de São Luís do Maranhão se encontrar numa posição geográfica privilegiada cuja latitude é 2,55° em relação a linha do equador e o fluxo de radiação médio diário é 837,34W/m<sup>2</sup>, segundo dados da Tese de Mestrado de LOPES,J.T (2004). Assim como também num futuro bem próximo, converter esta energia (térmica) armazenada na ZCI (Zona Convectiva Inferior) da piscina solar em energia elétrica, através de uma serpentina metálica em forma de espiral (trocador de calor), mergulhada na ZCI, na qual faz parte de um ciclo fechado contendo dentro da mesma um fluido de trabalho [80%H<sub>2</sub>O (água) + 20%(V/V)NH<sub>3</sub> (Amônia)], segundo BENNETT, (1978) que deverá transformar-se em vapor e circular pelo ciclo atingindo as palhetas de um turbogerador, fazendo com que o rotor do mesmo gire em torno de seu eixo e forneça energia elétrica para um circuito. Este vapor ao abandonar as palhetas do turbogerador, tende a entrar num condensador que o transforma em líquido (água + amônia) que é novamente lançado na (ZCI) da piscina solar de gradiente salino, através de uma bomba ou serpentina, obedecendo ao ciclo Rankine WILLIEEN, (2001). Conforme mostra figura 1.1.



**FIGURA 1.1 – Modelo de geração de energia elétrica utilizando a piscina solar WILLIEN, (2001)**

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Estudo de algumas piscinas solares**

O primeiro registro com referência ao lago solar natural foi o lago MEDVE na Transilvânia (42° 44'N, 28° 45E) e efetuado por KALECSINSKY, A.V. (1902), que fez a sua descrição. Este lago mostrou temperatura crescendo a 70 °C a uma profundidade de 1,32 m no fim do verão.

ANDERSON, C.G. (1958) registrou sobre um lago em Oroville (Estado de Washington) mostrando temperatura de 50 °C no meio do verão a uma profundidade de 2 m.

LESHUK, J.P. ; ZAWORSKI, R.J. ; STYRIS, D.L. ; e HARLING, O.K. ; (1978), estudaram a estabilização do gradiente salino de piscina solar.

NIELSEN, C.E. (1980), iniciou o estudo de piscina solar nos Estados Unidos da América na Universidade Estadual de Ohio, cujo interesse inicial era armazenar energia.

UGOLINO, Jr.L (1983), no Brasil traçou o perfil de temperatura e estudou um pequeno modelo circular de uma piscina de 1 m<sup>2</sup> de superfície e 0,43 m<sup>3</sup> de volume, utilizando solução de cloreto de cálcio.

NOGUEIRA, José Wilson Lage (1986), no Brasil construiu uma piscina solar de 36 m<sup>2</sup> de superfície e 54 m<sup>3</sup> de volume empregando solução de cloreto de sódio e estudou os perfis de temperatura e densidade, o desempenho teórico experimental e determinou o

coeficiente global de transmissão de calor, bem como a quantidade de sal difundida para a superfície.

TABOR, H. e DORON, B. (1990), apresentam “The Berth HA’ Arava-5MW-Solar Pond”. Construção e operação de uma planta de energia, com a piscina solar. Medida de eficiência e apresenta um custo total estimado para futuras plantas.

FOLCHITTO, Sergio.(1991), Agip-Petroli-Roma-Italy, propõe o trabalho denominado “Seawater as salt and water source for solar pond”. Método para piscina solar com 1 Km<sup>2</sup>, análise da competitividade entre fontes convencionais de energia e energia solar.

Como vemos os estudos e trabalhos apresentados sinalizam a viabilidade do uso das piscinas solares. De acordo com as possibilidades técnicas de hoje, a análise energética não busca apenas o bom aproveitamento da energia, mas de maneira geral, que se evite a utilização de toda a energia não renovável, em repouso sobre o planeta. E a radiação solar constitui uma inesgotável fonte energética, com enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão capaz de transformar-se em outras formas de energia (térmica e elétrica). Portanto, o aproveitamento da energia gerada pelo sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor, quanto de luz é uma das alternativas energéticas mais promissoras e desafiadoras do novo século.

## **2.2 Energia solar**

O sol, fonte de vida e origem dos outros modos de energia que o homem usou desde o começo da História, pode satisfazer todas nossas necessidades, se aprendermos a aproveitar de um modo racional a luz que continuamente derrama no planeta. A energia emitida pelo mesmo está garantida durante os próximos 6000 milhões de anos.

Tem brilhado no céu a aproximadamente cinco milhões de anos, e calcula-se que ainda não chegou nem a metade de sua existência. É preciso tirar vantagem por todos os meios possíveis desta inesgotável fonte de energia que pode nos tornar independente do

petróleo ou de outras alternativas menos segura, mais caras, com preços atrelados ao dólar. Porém, ainda existem problemas a superar. É preciso lembrar de que esta energia é sujeita a flutuações e variações. Por exemplo, a radiação é menor no inverno, quando mais precisamos dela. É muito importante continuar buscando tecnologia de recepção, acumulação e distribuição.

A energia solar é gerada no núcleo do sol. Lá, a temperatura ( $15.000.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e a pressão (340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da terra ao nível do mar) são tão intensas que ocorrem reações nucleares. Estas reações (fusão nuclear) transformam 4 prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio em uma partícula alfa, que é o núcleo de um átomo de hélio. A partícula alfa é aproximadamente 0,7% menos massiva do que 4 prótons. A diferença em massa é expelida como energia e “carregada” até a superfície do sol, através de um processo conhecido como convecção, e é liberado em forma de luz e calor. A energia gerada no interior do sol leva um milhão de anos para chegar à superfície. A cada segundo, 700 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em cinza de hélio. Durante este processo, 5 milhões de toneladas de energia pura são liberados; portanto, com o passar do tempo, o sol torna-se mais leve.

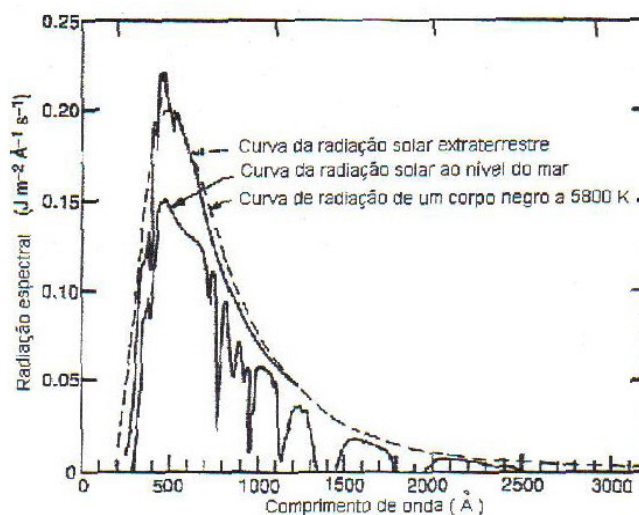
A energia gerada pelo sol chega na terra com uma variação da ordem de 3,3% durante o ano devido à variação da distância terra-sol ( $1,5.10^8\text{ Km}$ ), e de 1,5% devido à própria emissão do sol. A quantidade de energia solar recebida na atmosfera externa por ano é chamada de SERPY e é igual a  $1,5.10^{15}\text{ MWh}$ . É interessante notar que 1 SERPY é igual a 28.000 vezes a energia utilizada no mundo por ano. 30% da radiação solar recebida na atmosfera externa da terra é refletida de volta ao espaço na forma de radiação de ondas curtas. Quase 47% é absorvida pela atmosfera, superfície da terra, oceanos e convertida em calor na forma de temperatura ambiental do planeta. O restante 23% provoca evaporação, convecção, precipitação, etc. Uma parte pequena é usada na convecção atmosférica e oceanográfica e é da ordem de 370 bilhões de KW. Uma parte menor, ainda é utilizada na produção de biomassa, a qual, é da ordem de 40 bilhões de KW. Esses dois processos usam somente 0,4% da radiação solar atingida a superfície da terra.

### 2.3 Radiação solar ou radiação em ondas curtas

Quando deseja-se fazer estudos na área de energia solar, é interessante analisar apenas parte do espectro eletromagnético. A radiação de interesse abrange uma faixa de comprimento de onda que varia de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $2,5 \mu\text{m}$  denominada radiação solar. Segundo IQBAL, M. (1983), aproximadamente 95% da radiação emitida pelo sol encontra-se nesta faixa. Este espectro contém uma pequena parcela da radiação ultravioleta, toda a radiação visível e parte da radiação infravermelha.

O espectro da radiação solar fora da atmosfera terrestre é muito parecido com o de um corpo negro à temperatura de  $5.800 \text{ K}$  (que é a temperatura aproximada da superfície do sol), já o espectro da radiação solar que chega à superfície da terra não o é. Essa diferença no espectro envolve muitos fatores, incluindo a absorção, a dispersão e a reflexão da radiação com os vários tipos de partículas que compõem a atmosfera.

O Gráfico 2.1 relaciona a curva de radiação solar extraterrestre com um corpo negro a  $5.800 \text{ K}$  e a radiação solar ao nível do mar.



**GRÁFICO 2.1 – Distribuição espectral da radiação solar extraterrestre, da variação solar ao nível do mar e da radiação de um corpo negro a  $5.800 \text{ K}$ , JÚNIOR, (2000)**

## 2.4 Radiação solar extraterrestre

A radiação solar recebida acima da atmosfera é denominada radiação solar extraterrestre e seu estudo tem sido amplamente pesquisado. Nos anos 50, os valores da intensidade da radiação solar extraterrestre eram apenas estimados, pois as medidas eram realizadas na superfície da Terra. Já nos anos 70, com a evolução dos balões atmosféricos e aeronaves especiais, foi realmente possível medir a intensidade da radiação solar fora da atmosfera. Muitos experimentos foram realizados com diferentes instrumentos de medida, e deles resultaram o valor de  $1.353 \text{ W/m}^2 \pm 1,5\%$ , sendo aceito pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela American Society of Testing and Materials (ASTM).

Nos anos 80, através de novas medidas realizadas, passou-se a recomendar o valor de  $1.367 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$ , reconhecido pelo The World Radiation Center (WRC).

Este número é denominado constante solar ( $G_{sc}$ ) e é a energia recebida do Sol, por unidade de tempo, sobre uma área de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação solar a uma distância de 1 UA (distância média Terra-Sol =  $1,495 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ).

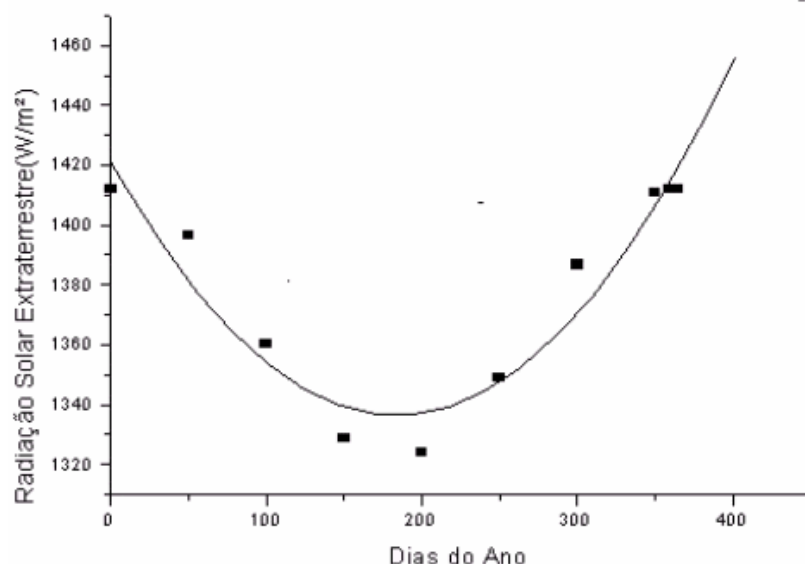
## 2.5 Variação da radiação solar extraterrestre ao longo do ano

A intensidade da radiação solar extraterrestre tem uma suave variação ao longo do ano devido à variação da distância entre a terra e o sol.

A dependência da radiação solar extraterrestre ao longo do ano, sobre uma superfície perpendicular aos raios do sol, é descrita com boa aproximação pela equação 2.1. ISMAIL, (2000).

$$G_T = G_{SC} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad 2.1$$

Utilizando a equação 2.1 ISMAIL, (2000) para os 365 dias do ano, obtém-se a curva apresentada no gráfico 2.2.



**GRÁFICO 2.2 – Variação da radiação solar extraterrestre ao longo do ano – ISMAIL, (2000).**

## 2.6 Radiação solar direta e difusa

A intensidade e a distribuição espectral da radiação solar que incide na superfície da terra dependem das condições atmosféricas e da massa atmosférica atravessada pela radiação. Ao atravessar a atmosfera, esta radiação percorre um caminho de constantes interações, sendo parcialmente absorvida e sofrendo inúmeras reflexões e espalhamentos. A partir destes fenômenos, o estudo da radiação solar incidente na superfície da Terra divide-se em duas partes distintas: a radiação solar direta, que é definida pela parcela da radiação que continuou seu caminho sem ser espalhada pela atmosfera, e a radiação solar difusa, parcela de radiação que sofrem modificações em sua trajetória ao atravessar a atmosfera. A soma das parcelas direta e difusa é denominada radiação global.

Com tempo claro, as proporções entre duas radiações variam no decorrer do dia, dependendo da altura do Sol, das quantidades de água, gás carbônico e poeira contidas na atmosfera. Nesta condição, segundo PALZ, W. (1981), a radiação direta é 10 vezes superior à radiação difusa quando o Sol está próximo do zênite, mas a difusa torna-se quase igual a direta quando o Sol está próximo do horizonte. Com tempo nublado, a radiação difusa é sempre superior à direta.

A medida da radiação solar é realizada por instrumentos de tempo denominados piranômetros, que registram os valores da radiação em intervalos de tempo determinados e, em geral, são armazenados em valores horários ou diários.

Na medida da radiação global, o piranômetro é colocado sobre uma base horizontal, que recebe a energia solar de todo o hemisfério, ou seja, de todas as direções.

Na medida da radiação difusa, o piranômetro deve ser protegido da luz solar direta por um pequeno disco ou cinta que mantém uma sombra constantemente sobre o sensor.

Na medida da radiação direta, utiliza-se um pireliômetro, instrumento que tem o sensor no interior de um tubo comprido, com uma abertura colimada, onde a superfície receptora deve ser mantida normal aos raios solares. O pireliômetro só é capaz de receber, portanto, os raios provenientes diretamente do sol.

## **2.7 Radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal**

Conhecer a intensidade da radiação solar recebida sobre uma superfície durante determinado tempo é essencial para um dimensionamento de sistemas que utilizam energia solar. A energia da radiação solar extraterrestre recebida durante um dia, sobre uma superfície paralela ao plano horizontal da superfície da Terra, é bem determinada através da equação 2.2. ISMAIL, (2002)

$$H_o = 3600 \cdot G_{SC} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cdot \left[ \frac{2 \cdot \omega_s}{15} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \frac{24}{\pi} \cdot \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s \right] \quad 2.2$$

Diferentemente do que acontece com a radiação solar extraterrestre, há muita dificuldade de antever através de métodos teóricos a intensidade da radiação solar sobre uma superfície horizontal nas proximidades da Terra, uma vez que as características atmosféricas estão variando constantemente. Devido a esta impossibilidade de predeterminar com eficácia a intensidade dessa radiação, as medidas desta grandeza são realizadas diretamente pelos piranômetros.

Os dados da radiação solar são geralmente fornecidos pelos serviços meteorológicos. No Brasil, os aparelhos destinados para a medida da intensidade da radiação solar existem em número muito aquém do que seria necessário. Segundo Baschiroto, 1998, um país como o Brasil, em comparação com a Argentina, deveria ter pelo menos 100 estações de qualidade operando continuamente. Na falta destes dados tem-se recorrido à correlações que relacionam o número de horas de brilho de Sol com a radiação solar. O número de horas de brilho do Sol é determinado com um instrumento conhecido como heliógrafo e que existe em quase todas as estações agrometeorológicas. Apesar das correlações e das medidas não terem alta precisão, estes dados permitem estimar a radiação solar nas localidades das estações.

Atualmente, um programa de análise de dados de observação por satélite pretende melhorar significativamente a oferta de dados solarimétricos no País. O Instituto Nacional de Meteorologia em conjunto com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina publicaram em 1998 um Atlas de Irradiação Solar do Brasil (1ª versão para radiação global derivada de satélite e validada na superfície), com o intuito de disponibilizar uma fonte de dados bastante confiável de radiação solar no País.

## **2.8 Radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada na superfície da terra**

A intensidade da radiação solar sobre uma superfície está fortemente relacionada com a sua inclinação e orientação. Como a maioria dos bancos de dados fornecem as medidas sobre a radiação solar incidente na superfície terrestre coletadas sobre superfícies horizontais (valores da radiação solar global), torna-se necessário estimar a intensidade da radiação solar recebida numa superfície inclinada.

A equação 2.3 utiliza o modelo de céu isotrópico, ou seja, a intensidade da radiação difusa é considerada uniforme em todas as direções, e para o intervalo de 1h, tem-se:

$$I_t = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \cdot \rho \cdot \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \text{ ISMAIL, (2000)} \quad 2.3$$

Existem outros modelos para a estimativa da radiação em superfícies inclinadas, a partir da radiação em superfície horizontal, sendo a diferença entre eles indicada pelas correlações admitidas para a obtenção da componente da radiação difusa. Trabalhos que desenvolveram comparações entre vários modelos concluíram que o modelo de PEREZ, R. (1987) é uma boa opção.

Este modelo, segundo PEREZ, R. (1987) assume uma radiância uniforme sobre todo o céu, exceto em um disco em torno do Sol e uma banda no horizonte, onde os valores da radiância difusa são incrementados. A magnitude deste incremento é considerada como sendo uma função de três parâmetros que descrevem a condição do céu em cada instante. Estes parâmetros se relacionam com a radiação difusa, a relação entre a radiação direta e a difusa e o ângulo de zênite solar. Sendo:

$$\Delta = \frac{I_d \cdot m}{I_0} \quad \epsilon = \frac{I_d + I_b}{I_0} \text{ ISMAIL, (2000)} \quad 2.4$$

A forma deste modelo é dada pela equação:

$$I_{d\beta} = I_d \cdot \left[ 0,5 \cdot (1 + \cos\beta) \cdot (1 - F_1) + F_1 \cdot \left( \frac{\cos\theta_s}{\cos\theta_z} \right) + F_2 \cdot \sin\beta \right] \text{ ISMAIL, (2000)} \quad 2.5$$

Os coeficientes  $F_1$  e  $F_2$  são obtidos através das equações empíricas:

$$F_1 = F_{11}(\epsilon) + F_{12}(\epsilon) \cdot \Delta + F_{13}(\epsilon) \cdot \theta_Z$$

$$F_2 = F_{21}(\epsilon) + F_{22}(\epsilon) \cdot \Delta + F_{23}(\epsilon) \cdot \theta_Z \quad \text{ISMAIL, (2000)} \quad 2.4$$

Os valores de  $F_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ;  $j = 1, \dots, 3$  são mostrados na tabela 2.1:

**TABELA 2.1 – Coeficiente de  $F_1$  e  $F_2$**

| COEFICIENTE DE $F_1$ e $F_2$ |                   |          |          |          |          |          |          |
|------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Intervalo                    | $\epsilon$        | $F_{11}$ | $F_{12}$ | $F_{13}$ | $F_{21}$ | $F_{22}$ | $F_{23}$ |
| 1                            | 1,000 a 1,056     | - 0,042  | 0,550    | - 0,044  | - 0,120  | 0,138    | - 0,034  |
| 2                            | 1,056 a 1,253     | 0,261    | 0,559    | - 0,243  | - 0,019  | 0,083    | - 0,081  |
| 3                            | 1,253 a 1,586     | 0,481    | 0,460    | - 0,354  | 0,077    | 0,006    | - 0,116  |
| 4                            | 1,586 a 2,134     | 0,825    | 0,187    | - 0,532  | 0,172    | - 0,050  | - 0,151  |
| 5                            | 2,134 a 3,230     | 1,102    | - 0,299  | - 0, 586 | 0,350    | - 0,398  | - 0,171  |
| 6                            | 3,230 a 5,980     | 1,226    | - 0,451  | - 0,617  | 0,444    | - 0,949  | - 0,073  |
| 7                            | 5,980 a 10,080    | 1,367    | - 0,838  | - 0,655  | 0,431    | - 1,750  | 0,094    |
| 8                            | 10,080 a $\infty$ | 0,978    | - 0,812  | - 0,393  | 0,335    | - 2,160  | 0,186    |

**Fonte: ISMAIL, (2000)**

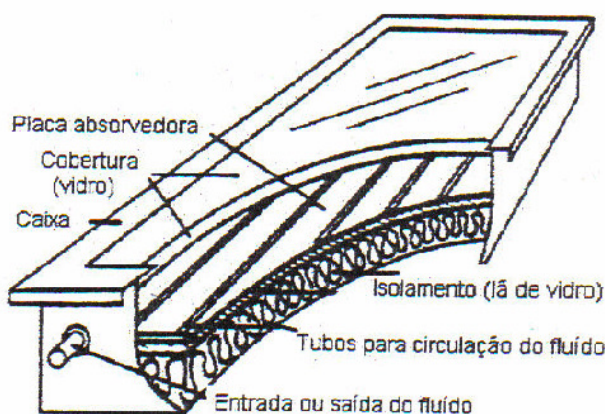
## 2.9 Formas de coletar energia solar

Num sistema de aquecimento solar, o coletor é o equipamento responsável pela conversão da energia solar em calor. Conhecer o processo desta conversão é essencial para que se possa aproveitar ao máximo sua capacidade de fornecer aos fluidos (água, ar) temperaturas muito superiores às temperaturas do meio ambiente.

Os coletores solares podem ser classificados em duas categorias: os de placa plana e os de concentração. Os coletores de concentração utilizam lentes ou espelhos para concentrar a luz solar sobre um elemento ao absorver e assim atingem temperaturas bastante elevadas. SALVADORETTI, J.L. (1983), fez análises das características básicas dos principais tipos de coletores concentradores.

Para o aquecimento de água de uso doméstico, no entanto, os concentradores são mais caros e menos eficientes que os coletores planos. Devido isto, os coletores planos são mais usados.

Os coletores planos são essencialmente constituídos por uma caixa, com uma cobertura transparente à radiação solar (vidro) e uma placa metálica (absorvedora), formada de pequenos tubos por onde escoo o fluido ou sobre a qual é soldada uma grade, de tubos por onde escoo o fluido. Esta placa metálica é pintada de preto fosco e instalada na caixa com isolamento lateral e interior conforma mostra figura 2.1.



**FIGURA 2.1 – Coletor solar de placa plana – JÚNIOR, (2000)**

Coletores como o da figura 2.1, quando bem construídos, podem aquecer a água da temperatura ambiente até cerca de 100 °C, dependendo da temperatura ambiente e da radiação solar, e funciona muito bem para temperaturas em torno de 60 °C.

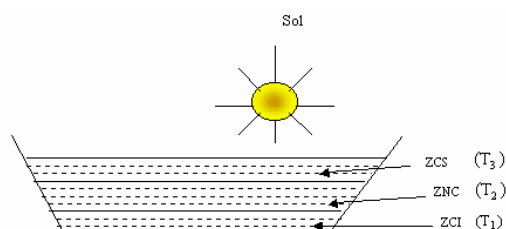
## 2.10 Piscina solar de gradiente salino

O uso de piscina solar está se tornando muito atrativo no cenário energético atual. A maior vantagem da piscina solar sobre outros coletores é a sua capacidade de armazenar energia térmica por longo período de tempo. A piscina solar de gradiente salino é um recipiente de água salgada com isolamento térmico preto no fundo e camadas horizontais com diferentes concentrações de sal.

Essa diferença impede que as camadas superiores, de água fria, desçam e as inferiores, de água quente, subam para a superfície devido à diferença de densidade (convecção natural). Com isso, o calor fica armazenado e permite produzir energia térmica de maneira limpa, o que significa uma vantagem em relação aos coletores solares, que precisam constantemente de luz.

Nessa primeira etapa, o calor armazenado é utilizado apenas para esquentar a água. Em seguida, ele produz energia elétrica, quando utilizado em um sistema acoplado a um turbogerador alimentado por uma solução de água e amônia (ciclo combinado). O calor armazenado no fundo da piscina provoca a mudança de estado da solução, gerando vapor sob pressão, o qual aciona o gerador e produz energia elétrica.

Capaz de abastecer casas populares e indústrias, a piscina solar tem tamanho que pode variar de uma caixa d'água a vários campos de futebol. Ela pode ser construída em qualquer lugar que receba radiação solar, com melhor aproveitamento em latitudes menores que 40° e abaixo do nível do solo. A figura 2.2 ilustra uma piscina solar.



**FIGURA 2.2 – Representação da piscina solar e suas respectivas camadas – UGOLINO, (1983)**

### *2.10.1 Classificação das piscinas solares*

As piscinas solares classificam-se, de acordo com o método de isolamento da superfície transparente, em dois tipos:

#### *2.10.1.1 Piscina Solar Convectiva*

A convecção entre o fundo e a superfície não é eliminado. As perdas térmicas da superfície superior para o ambiente são reduzidas utilizando-se plásticos transparentes e isolantes colocados na superfície da piscina.

#### *2.10.1.2 Piscina Solar Não Convectiva*

As correntes de convecção são eliminadas na região intermediária entre a camada superior e inferior da piscina, reduzindo-se assim, as perdas de calor para o ambiente. Um gradiente de densidade por variação da concentração de solução salina, saturada ou não, é a forma mais empregada para reduzir a perda pelo topo neste tipo de piscina.

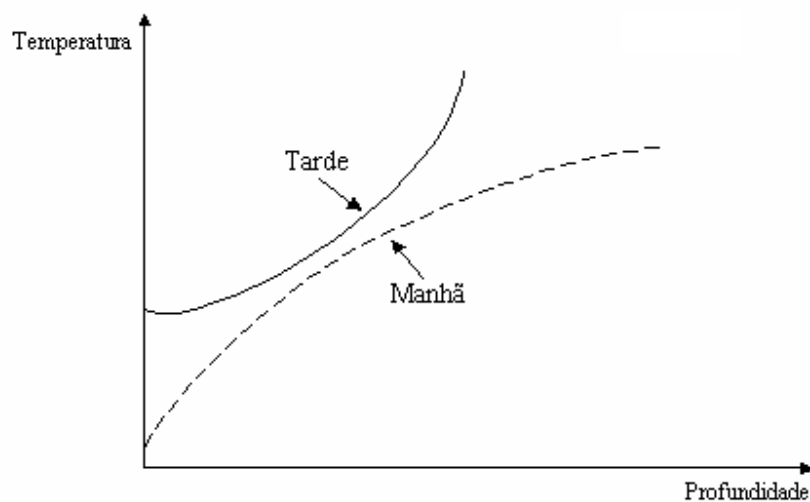
## **2.11 Princípio físico de uma piscina solar**

Numa piscina comum, aquecida pela radiação solar, a água do fundo diminui de densidade e desloca-se para as camadas superiores onde dissipa calor em trocas térmicas com a atmosfera. Numa piscina solar, impõe-se um gradiente de densidade crescente com a profundidade, mediante um gradiente de concentração de sal na água. Isto inibe a subida de sal da água para a superfície quando aquecida e desta forma, a convecção. Uma vez suprida a convecção natural e sendo a água, dentro da faixa de temperatura de operação da piscina solar, opaca à radiação infravermelha que é emitida pelo fundo e pelo próprio líquido, somente perdas de calor por condução poderão ocorrer entre a região mais profunda e a superfície. Por outro lado, a zona não convectiva (onde há o gradiente de densidade), atua como isolante devido a baixa condutividade térmica da água, ajudando a manter o aquecimento da camada inferior. Assim, temperaturas de operação de 50 a 90 °C são obtidas no fundo da piscina solar de gradiente salino.

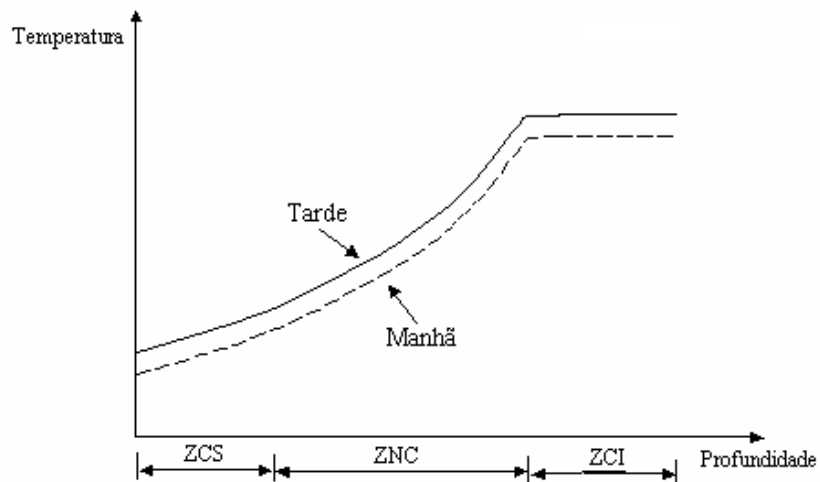
## 2.12 As três zonas de convecção de uma piscina solar

Uma piscina solar tem, normalmente, três regiões distintas. A primeira, denominada Zona Convectiva Superior (ZCS), que se sobrepõe a região intermediária chamada de Zona Não Convectiva (ZNC), devido a existência do gradiente de densidade que elimina a convecção. No fundo há outra região convectiva: A Zona Convectiva Inferior (ZCI).

A origem das Zonas Convectivas (ZCS e ZCI), é explicada qualitativamente, segundo NIELSEN, (1980). Se a piscina solar pudesse ser mantida inteiramente não convectiva, após um dia de intensa insolação, o perfil de temperatura no fundo (onde há absorção da radiação solar) seria muito acentuado, excedendo o limite de estabilidade para dado gradiente de salinidade. Portanto, numa piscina real (estabilizada), não pode haver, de fato, o perfil da temperatura mostrado no gráfico 2.3a. As variações térmicas iniciais levarão a uma camada convectiva e isotérmica no fundo da piscina solar, conforme gráfico 2.3b.



**GRÁFICO 2.3a – Perfil da temperatura em função da profundidade – NOGUEIRA, (1986)**



**GRÁFICO 2.3b – Perfil da temperatura em função da profundidade - NOGUEIRA, (1986)**

Esta zona convectiva inferior se desenvolverá até a profundidade onde o gradiente de temperatura na camada não convectiva for inferior ao valor que possa ser suportado pelo gradiente salino. A ZCI terá, portanto, uma espessura que dependerá da insolação que atinge o fundo da piscina de gradiente salino, da ZNC e das propriedades do solo.

A Zona Convectiva Superior depende das variações da energia solar incidente, das partes térmicas e, principalmente, da agitação da água provocada pelos ventos.

### 2.13 Origem das camadas convectivas

As camadas convectivas originam-se através de:

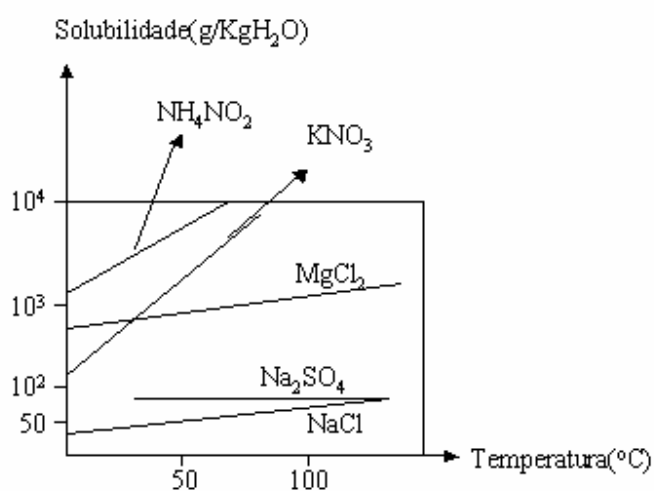
- Variações térmicas no fundo e na superfície, poderiam conduzir a elevados gradientes de temperaturas, numa piscina solar totalmente não convectiva (hipotética).
- Numa piscina real, camadas com elevados gradientes de temperatura seriam instáveis e são substituídas por regiões Convectivas (ZCS e ZCI). Adaptado por NIELSEN, C.E. (1980).

## 2.14 A escolha do sal

Na relação do sal, devem ser considerados os seguintes critérios:

- a) Baixo custo e disponibilidade;
- b) Inocuidade ao homem e ao meio ambiente;
- c) Solubilidade adequada e crescente com a temperatura;
- d) Adequada transparência da solução salina à radiação incidente.

## 2.15 Gráfico da solubilidade de alguns sais comuns em função da temperatura



**GRÁFICO 2.4 – Solubilidade de alguns sais comuns em função da temperatura - NOGUEIRA, (1986)**

## 2.16 Condição de estabilidade de uma piscina solar

Para que haja uma variação de densidade, crescente com a profundidade x numa piscina solar, devemos ter:

$$\frac{d\rho}{dx} > 0 \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.7$$

Sendo:  $\rho = \rho(s,T)$ , onde  $s = s(x)$  e  $T = T(x)$ , a equação 2.7 pode se escrita como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial s} \cdot \frac{ds}{dx} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx} > 0 \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.8$$

Para que seja eliminada a convecção e seja mantida a estabilidade, a variação de densidade provocada pelo aumento de temperatura deve ser igual ou inferior à variação de densidade causada pelo gradiente de concentração salina. Portanto, temos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx} \leq \frac{\partial \rho}{\partial s} \cdot \frac{ds}{dx} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.9$$

O gradiente de concentração deverá satisfazer a condição:

$$\frac{ds}{dx} \geq - \frac{\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx}}{\frac{\partial \rho}{\partial s}} \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.10$$

WEINBENDER, H. (1964) considerando os efeitos da viscosidade e difusão na solução, mostrou que para prevenir oscilações (instabilidade) crescentes com o tempo, a condição deve ser:

$$\frac{ds}{dx} \geq - \frac{(v + k_T)}{(v + k_s)} \cdot \frac{\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx}}{\frac{\partial \rho}{\partial s}} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.11$$

## 2.17 Difusão do sal

A difusão do sal, causada pela existência do gradiente de concentração, é regida pela equação diferencial de transferência de massa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_s \cdot \frac{\partial s}{\partial x} \right) = \frac{\partial s}{\partial T} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.12$$

Nas condições de estado estacionário,  $\partial s / \partial T = 0$ , e, integrando a equação 2.12, obtém-se o fluxo de sal que difunde para a superfície:

$$\text{Lei de Fick (difusão de massa)} \quad q = -k_s \cdot \frac{ds}{dx} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.13$$

## 2.18 Absorção e percurso da radiação solar

A intensidade da radiação solar, que penetra numa camada de água, decresce à medida que aumenta a profundidade. Uma fórmula válida especialmente para espessuras de camadas entre 0,01 e 10 m, qualifica a fração da energia incidente que resta após o percurso de y metros através da água.

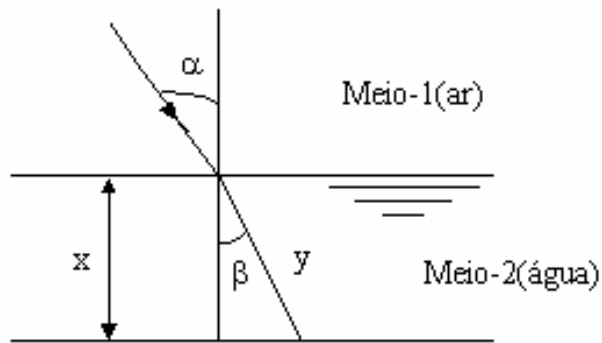
Para águas claras vale:

$$h = a - b \cdot \ln(y) \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.14$$

Para que h seja adequadamente explicitado, a equação 2.14 pode ser escrita na forma:

$$h = b \cdot \ln\left(\frac{y_0}{y}\right) \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.15$$

Dependendo do ângulo de incidência, o percurso y de um raio solar de (luz visível) na água será maior que a profundidade x, como ilustra a gráfico 2.5 e a equação 2.16.



**GRÁFICO 2.5 – Ilustração da refração da luz**

No gráfico acima, temos a Refração da Luz:

$$y = \frac{x}{\cos(\beta)} \text{ TIPLER, (1995)} \quad 2.16$$

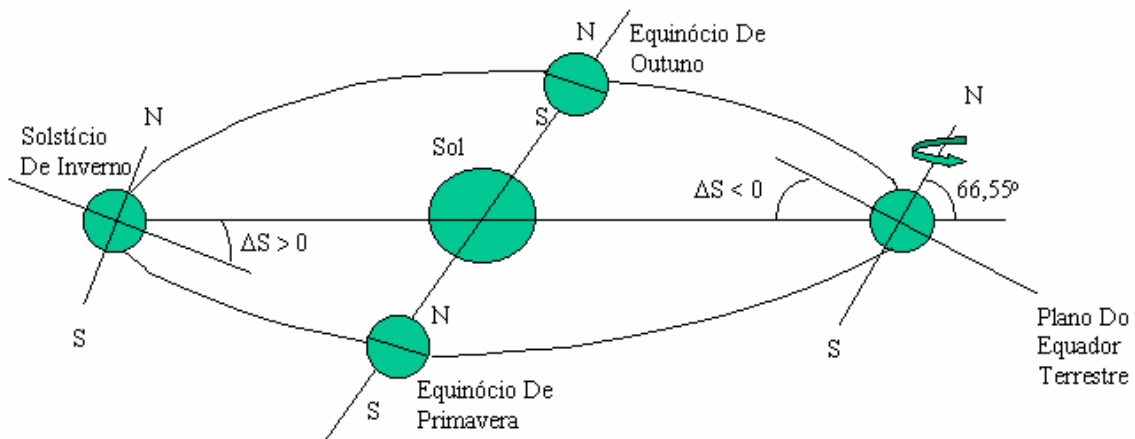
Sendo:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = 1,33 \text{ TIPLER, (1995)} \quad 2.17$$

O ângulo  $\alpha$  pode ser determinado pela equação:

$$\cos(\alpha) = \sin(\Delta s) \cdot \sin(\phi) + \cos(\Delta s) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega) \quad \text{ISMAIL, (2000)} \quad 2.18$$

A figura 2.3 fornece as ocasiões anuais importantes no Hemisfério Sul.



**FIGURA 2.3 – Ocasões anuais no hemisfério sul - ISMAIL,**

Nem sempre a hora legal coincide com a hora solar utilizada na definição de  $\omega$  e  $\Delta s$ , devido à diferença de longitude entre o meridiano local onde se encontra o observador e o meridiano pelo qual o horário é estabelecido. Deve-se também às variações que ocorrem na taxa de rotação da Terra. Estes dois fatores combinados provocam variações no intervalo em que o Sol cruza o meridiano do observador em dias consecutivos.

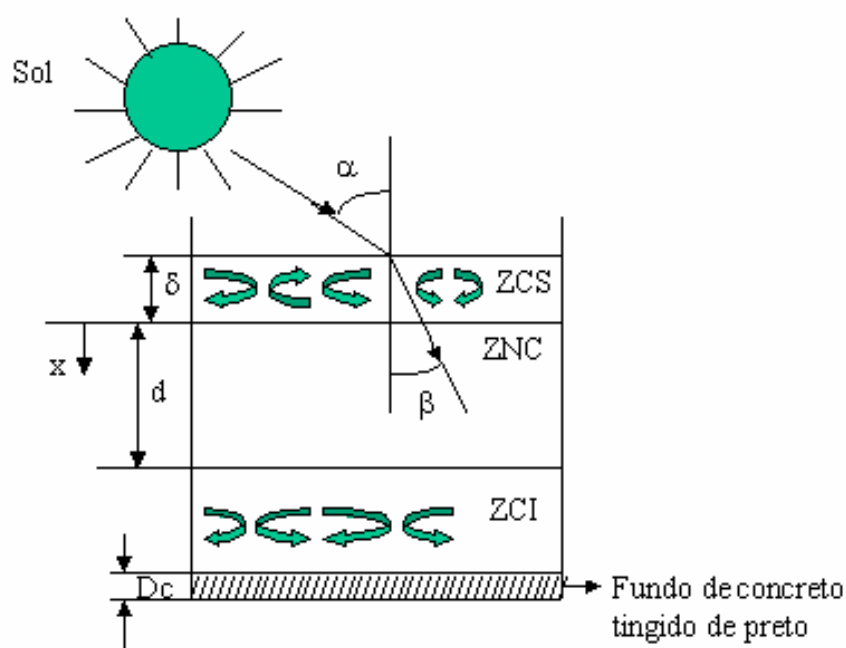
A hora solar é relacionada com a hora legal pela equação adaptada por :

$$\text{Hora Solar} = \text{hora legal} + \left[ \frac{L_r - L_l}{15} + \frac{E}{60} \right] \quad \text{DUFFIE, (1974)} \quad 2.19$$

Um tratamento analítico, que considere a variação horária e anual do ângulo de incidência, introduziria parâmetros cujas análises estão fora do alcance deste estudo.

## 2.19 Modelo matemático

Escolhemos o modelo matemático, proposto por WANG, Y.F and AKBARZADEH, A. (1983) para análise da piscina solar em estado estacionário, como mostra a figura 2.4. Neste modelo, desprezam-se as perdas laterais, admitindo-se área infinita para a piscina. As trocas de calor por condução ocorrem apenas entre a ZCI e a ZCS, acrescidas das perdas energéticas entre o fundo da piscina e o solo abaixo.



**FIGURA 2.4 – Modelo matemático para análise da piscina solar em estado estacionário – UGOLINO, (1983).**

Baseado nos dados de Kaufmann, foi obtida a seguinte equação para a condutividade térmica de uma solução de NaCl:

$$k_{sl} = A + B \cdot S + C \cdot (T - 20) \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.20$$

## 2.20 Hipóteses

Para o caso específico, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- a) Condução unidimensional, em regime permanente (estado estacionário);
- b) Condutividade térmica da solução dependente da concentração salina e temperatura;
- c) Temperatura do solo, a determinada profundidade “Ds” do fundo da piscina, igual à temperatura média anual do ambiente;
- d) Temperatura da ZCS uniforme e igual à temperatura ambiente;
- e) Temperatura e concentração da ZCI uniforme e aproximadamente constante.

## 2.21 Equacionamentos

A difusão do calor na piscina solar, em estado estacionário, é governada pela equação:

$$-k_{sl} \cdot \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d\phi}{dx} = 0 \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.21$$

Usando as equações 2.15 e 2.16, obtém-se:

$$\phi = \tau \cdot H \cdot b \cdot \ln \left[ \frac{y_o \cdot \cos(\beta)}{x + \delta} \right] \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.22$$

Integrando a equação 2.21 para  $K_{sl}$ , independente de  $x$  e  $T$ , temos:

$$-k_{sl} \cdot \frac{dT}{dx} + \phi = C_1 \text{ EDWARDS, (1995)} \quad 2.23$$

Introduzindo a variável  $\theta$ , definida por:

$$\theta = T - T_a \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.24$$

A equação 2.23 ficará:

$$-k_{sl} \cdot \frac{d\theta}{dx} + \phi = C_1 \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.25$$

Substituindo as funções de  $k_{sl}$  e  $\phi$  dados pelas equações 2.20 e 2.22, a equação 2.25 fica:

$$-(A + B \cdot S + C \cdot \theta) \cdot \frac{d\theta}{dx} + \tau \cdot H \cdot b \cdot \ln \left[ \frac{y_o \cdot \cos(\beta)}{x + \delta} \right] = C_1 \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.26$$

Para simplificação, desprezamos na equação 2.26 a diferença entre a temperatura média ambiente e a temperatura de referência (20 °C) usada na equação 2.20.

Percebe-se ainda na equação 2.20, que a dependência da condutividade térmica é maior em relação à temperatura do que à concentração. Assim, a variação da concentração pode ser desprezada, adotando-se nos cálculos um valor médio. Para tanto na ZNC, admite-se a variação linear da concentração com a profundidade.

Adotando-se estas aproximações para o cálculo da condutividade térmica pela equação 2.20, introduz-se um erro que é geralmente menor que 2%.

Se  $S_m$  é a concentração média, a equação 2.26 fica:

$$-(A + B \cdot S_m + C \cdot \theta) \cdot \frac{d\theta}{dx} + \tau \cdot H \cdot b \cdot \ln \left[ \frac{y_o \cdot \cos(\beta)}{x + \delta} \right] = C_1 \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.27$$

Integrando a equação 2.27, obtém-se:

$$-(A + B \cdot S_m) \cdot \theta - \frac{C}{2} \cdot \theta^2 + \tau \cdot H \cdot b \cdot \left\{ \ln \frac{[\cos(\beta)]^x}{(x + \delta)^{(x + \delta)}} + x \right\} = C_1 \cdot x + C_2 \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.28$$

$C_2$  pode ser determinado aplicando-se a seguinte condição de contorno:

$$T = T_a \quad \text{em} \quad x = \phi \text{ NOGUEIRA, (1986)}$$

Ou seja:

$$\theta = \phi \quad \text{em} \quad x = \phi \text{ NOGUEIRA, (1986)}$$

Esta condição na equação 2.28, resulta:

$$C_2 = -\tau \cdot H \cdot \delta \cdot b \cdot \ln(\delta) \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.29$$

## 2.22 Determinação de $C_1$

Fazendo-se o balanço energético e admitindo-se que toda energia incidente na ZCI é absorvida nesta região, o balanço para um elemento de água em  $d$  (interface ZNC – ZCI), resulta:

$$\tau \cdot H \cdot b \cdot \ln \left[ \frac{y_o \cdot \cos(\beta)}{d + \delta} \right] - k_{s1} \cdot \frac{d\theta}{dx} = Q_f + Q \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.30$$

A equação 2.30 é válida quando  $x = d$ .

$$Q_f = \frac{\theta d}{\frac{D_c}{k_c} + \frac{D_s}{k'}} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.31$$

Substituindo a expressão de  $Q_f$  dada na equação 2.31 na equação 2.30 e comparando-a com a equação 2.27 em  $x = d$ , conclui-se que:

$$C_1 = Q + \frac{\theta d}{\frac{D_c}{k_c} + \frac{D_s}{k'}} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.32$$

## 2.23 Temperatura da ZCI

A temperatura  $T_d$  da ZCI da piscina solar pode ser obtida da equação 2.30, fazendo-se  $x = \phi$  e substituindo-se as constantes  $C_1$  e  $C_2$  por seus valores correspondentes determinadas nas equações 2.29 e 2.32.

A utilização prática de um valor médio para a condutividade térmica da água, estabelecida em função das diferenças de temperatura e concentração entre ZCI e ZCS, introduzirá um pequeno erro (menor que 1%) no cálculo de  $\theta$ . Se:

$$k_{sl} = A + B \cdot S_m + C \cdot \theta_m = \text{constante} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.33$$

Então, a equação 2.28 em  $x = d$ , ficará:

$$k_{sl} \cdot \theta d + \tau \cdot H \cdot b \cdot \left\{ \ln \frac{[y_0 \cdot \cos(\beta)]^d}{[d + \delta]^{(d+\delta)}} + d \right\} = \left( Q + \frac{\theta d}{\frac{D_c}{k_c} + \frac{D_s}{k'}} \right) \cdot d - \tau \cdot H \cdot b \cdot \delta \cdot \ln(\delta) \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.34$$

Sendo  $\theta_d = T_d - T_a$ , a equação 2.34, reagrupada, torna-se:

$$T_d - T_a = \frac{\tau \cdot H \cdot b \cdot \left\{ \delta \cdot \ln(\delta) + \frac{\ln[y_0 \cdot \cos(\beta)]^d}{[d + \delta]^{(d+\delta)}} + d \right\} - Q \cdot d}{k_{sl} + \frac{d}{\frac{D_c}{k_c} + \frac{D_s}{k'}}} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.35$$

## 2.24 Rendimento térmico ( $\eta_t$ )

Defini-se rendimento térmico da piscina solar, como sendo:

$$\eta_t = \frac{Q}{H} \quad \text{NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.36$$

A equação 2.34 dividida por  $H_d$  e reordenada, resulta:

$$\eta_t = \frac{\tau \cdot b}{d} \cdot \ln \left\{ \delta^\delta \cdot \frac{[y_0 \cdot \cos(\beta)]^d}{[d + \delta]^{(d + \delta)}} + \tau \cdot b - \left( \frac{1}{\frac{D_c}{k_c} + \frac{D_s}{k'}} + \frac{1}{\frac{d}{k_{sl}}} \right) \cdot \frac{\theta_d}{H} \right\} \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.37$$

## 2.25 Equacionamento básico para o estudo experimental

### 2.25.1 Energia Útil ( $Q_u$ )

Defini-se  $Q_u$  como a energia que cruza a fronteira da ZCI, considerada positiva quando é fornecida à região de armazenamento e negativa quando é extraída.

Um balanço energético em  $d$ , no período de tempo  $\Delta t$ , fornece:

$$Q_u = [\tau \cdot A' \cdot H_p \cdot h_d - U \cdot A' \cdot \theta_d] \cdot \Delta t \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.38$$

A energia útil pode ser determinada por:

$$Q_u = m' \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ HALLIDAY, (1996)} \quad 2.39$$

### 2.25.2 Coeficiente Global Da Transmissão De Calor ( $U$ )

Substituindo  $Q_u$  da equação 2.39 na equação 2.38, resulta:

$$U = \frac{\tau \cdot A' \cdot H_p \cdot h_d - \frac{m' \cdot c_p \cdot \Delta T}{\Delta t}}{\theta_d \cdot A'} \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.40$$

Quando  $H_p = \phi$  (períodos noturnos), a equação 2.40 reduz-se a:

$$U = - \frac{m' \cdot c_p \cdot \Delta T}{\theta_d \cdot A' \cdot \Delta t} \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.41$$

### 2.25.3 *Rendimento Equivalente Médio ( $\eta$ )*

Defini-se rendimento equivalente médio, em um período  $\Delta t$ , pela relação entre a energia útil e energia total incidente na superfície. Então:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_i} \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.42$$

Utilizando  $Q_u$  dado pela equação 2.38,  $\eta$  será determinado pela relação:

$$\eta = \frac{(\tau \cdot A' \cdot H_p \cdot h_d - U \cdot A' \cdot \theta_d) \cdot \Delta t}{H_p \cdot A' \cdot \Delta t} \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.43$$

Ou

$$\eta = \tau \cdot h_d - U \cdot \frac{\theta_d}{H_p} \text{ NOGUEIRA, (1986)} \quad 2.44$$

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

#### **3.1 Metodologia – Piscina Solar**

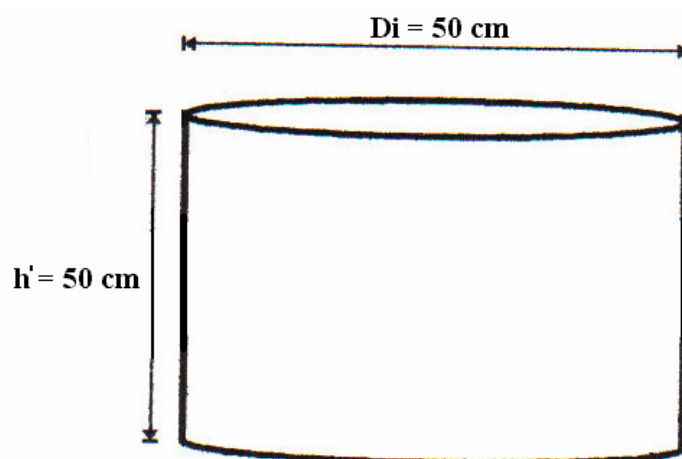
A metodologia empregada para a coleta dos dados referentes às temperaturas médias de cada camada, assim como também a temperatura ambiente em função do tempo, na realização do teste de rendimento térmico, foram obtidos colocando a piscina de gradientes salino exposto à radiação solar, cujas medidas foram obtidas por um termômetro digital MT – 505 (I canal), segundo manual de fabricante que é a Minipa, o mesmo apresentando as seguintes características: Resolução 0,1 °C / 0,1 °F; Função MÁX / MÍN; Faixa de Medida: de -50 °C a 1.300 °C ou de -58 °F a 2.000 °F; ON / OFF; Ajuste de Offset; Sensor de Presença de Termopar; Função Hold; Dimensões: 184 (A) x 62 (L) x 35 (p) mm; Peso: aproximadamente 300 g com bateria; acompanhado de um termopar em forma de sonda do tipo MTK - 03 (alumel, cromel), tendo seu cabo comprimento de 1.170mm; Faixa de Medição: -50 °C a 200 °C ou -58 °F a 392 °F; Precisão:  $\pm 0,75$  % da leitura ou  $\pm 2,2$  (o que for maior). O valor médio diário da radiação incidente na piscina solar foi de 837,34W/m<sup>2</sup>, segundo dados da Tese de Mestrado de LOPES, (2004), para latitude de 2,55° em relação à linha do equador em São Luís do Maranhão. Os ensaios para determinação dos pontos para montagem das curvas foram realizados ao longo de 11 dias, entre 10 de agosto a 20 de agosto de 2005.

### 3.1.1 Construção do Reservatório

Normalmente, uma piscina solar é construída cavando-se um volume de terra, planando-se bem a área do local e construindo-se uma parede retentora de concreto em torno do perímetro.

Para pequenas piscinas, isto representa uma diferença considerável entre a área da superfície superior e a área da superfície inferior. Para grandes piscinas este efeito é menor. Após as paredes terem sido construídas, a piscina e as declividades laterais das paredes devem ser revestidas com impermeabilização e isolamento térmico para evitar vazamento e infiltrações, assim como seu fundo deve ser tingido de preto para uma maior absorção de calor no fundo (ZCI ou  $Z_a$ ).

Entretanto, a piscina solar do presente trabalho é de concreto armado e de formato cilíndrico, sendo adquirida em uma casa de pré-moldados, possuindo dimensões padronizada conforme mostra figura 3.1.

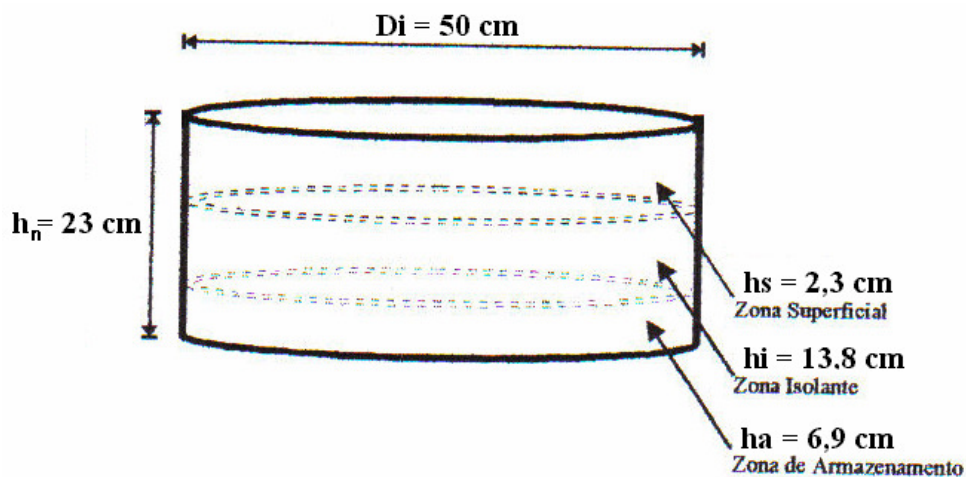


**FIGURA 3.1 – Dimensões padronizadas pela casa de pré-moldados**

Porém, rebaixamos a sua altura, pois  $D_i \neq h_n$ ; sendo que:  $D_i > h_n$  para que haja maior captação de insolação solar. Isto significa dizer que a piscina tem que ser rasa e, em

decorrência disto, a piscina foi preenchida com concreto a partir de sua base até alcançar a altura de 26,7 cm, restando 23,3 cm. Porém, a altura que nos interessa é de 23 cm, porque os 3 mm foi preenchido com betume (impermeabilizante, possuindo alto poder absorvedor de calor), após ter sido derretido e espalhado no fundo da zona de armazenamento; a altura corresponde a 23 cm devido existir a relação entre o diâmetro interno ( $D_i$ ) e altura ( $h_n$ ); sendo que:  $D_i / h_n = k$ , segundo JORGE, (2001), onde  $k$  corresponde a uma constante, que para o nosso caso usamos 2.

Esta altura  $h_n$  de 23 cm para efeito experimental foi dividida em 3 partes diferentes, segundo JORGE, (2001), de tal forma que:  $h_a = 0,3.h$  (altura de armazenamento);  $h_i = 2.h_a$  (altura intermediária);  $h_s = 1/3.h_a$  (altura de superfície). Estas alturas foram demarcadas nas paredes internas da piscina solar, utilizando pedaços iguais de fita isolante que foram coladas, como mostra as figuras 3.2 e 3.8. Estes cálculos estão apresentados no Apêndice A.3.



**FIGURA 3.2 – Dimensões da piscina solar e suas respectivas camadas**

Para evitar a perda de calor por condução e irradiação, a piscina solar de gradiente salino foi revestida primeiramente com lã de vidro, cuja espessura é de 1,4 cm e logo em seguida com papel alumínio, cuja espessura das camadas juntas correspondem a 3 mm,

tanto nas paredes laterais externas como no fundo. Ela não foi enterrada e sim colocada sobre uma sapata de alvenaria em formato de cruz com as seguintes dimensões:  $h = 73$  cm (altura);  $e = 11$  cm (espessura) ;  $c = 65$  cm (comprimento). Veja a figura 3.3



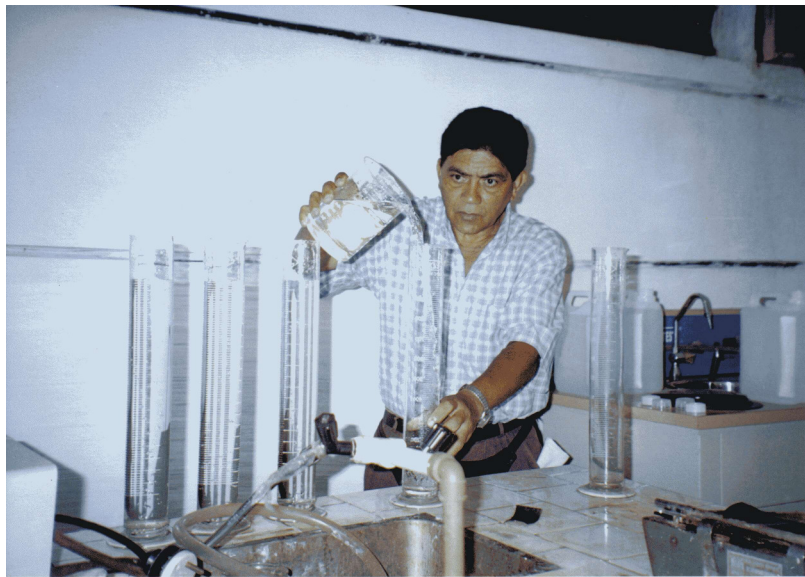
**FIGURA 3.3 – Piscina solar sobre a sapata de alvenaria**

### *3.1.2 Determinação teórica e prática do volume da quantidade de solvente (água doce) de cada camada*

Teoricamente, o volume de cada camada foi encontrado através da equação  $V = A.h$ , vide cálculo no Apêndice A.4, e, experimentalmente, através de 05 provetas, cada uma delas de 1000 mL e também 01 Becker de 500 mL, juntamente com 3 baldes plástico de capacidade diferente, vide as figuras 3.4a e 3.4b.



**FIGURA 3.4a – Colocação de água no Becker**



**FIGURA 3.4b – Colocação de água nas provetas**

### *3.1.3 Determinação teórica e prática da quantidade de massa do soluto (Cloreto de Sódio = NaCl) que foi utilizada em cada camada*

Para podermos determinar a quantidade de sal (soluto) utilizado em cada camada, tivemos que impor um gradiente salino de densidade em cada uma delas, segundo JORGE, (2001). De tal formas que: na região de armazenamento foi de 200 g/L; na região intermediária foi de 100 g/L e na região superficial 50 g/L, cálculos vide Apêndice A.5 e, experimentalmente, usamos uma balança analítica: marca Marte, modelo AC10K, ano 2003, recentemente aferida pelo Inmetro, N° 264802, carga máxima de 10 Kg, carga mínima de 5 g, divisão de verificação de 1 g e funcionamento sob tensão de 220 V alternada, conforme mostra a figura 3.5.



**FIGURA 3.5 – Pesagem do soluto (NaCl) de cada zona**

### *3.1.4 Determinação da massa do solvente (água doce) das 03 camadas*

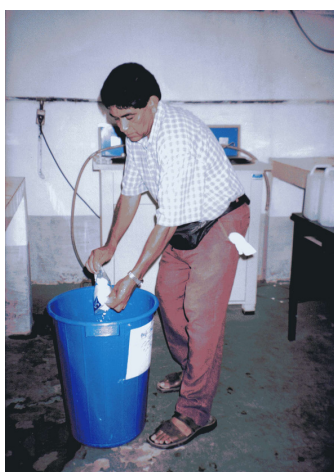
Para determinarmos a massa do solvente, basta multiplicarmos a densidade da água pelo seu volume, vide cálculo no Apêndice A.6.

### 3.1.5 Determinação da titulação de cada zona

Para determinarmos a titulação de cada camada, basta dividirmos a massa do soluto pela massa do solvente e esta é expressa sob forma de percentagem, vide cálculo Apêndice A.7.

## 3.2 Preparação de cada solução

Primeiramente, fizemos a solução da zona de armazenamento (Za) da seguinte forma: tomamos um balde plástico com tampa de capacidade 15 L e colocamos dentro do mesmo 13,54 L de água doce e depois adicionamos 2,71 Kg de sal de cozinha. E em seguida, mexemos a mesma com uma ripa de madeira bem lixada e limpa de tal forma que, quando a mesma ficou em repouso, não ficou precipitado no fundo. Logo em seguida, foi feita a solução da zona intermediária (Zi) da seguinte forma: colocamos dentro de um balde com tampa de capacidade 30 L, 27,08 L de água doce e em seguida adicionamos 2,71 Kg de NaCl e depois mexemos a mesma com a mesma ripa (limpa); esperamos o seu repouso de tal forma que não ficasse precipitado no fundo e por último despejamos 4,51 L de água doce dentro de um balde com tampa de 10 L, adicionando 225 g de sal de cozinha e mexendo com a mesma ripa (limpa), esperando seu repouso de tal maneira que não ficasse precipitado no fundo, formando assim a solução da zona de superficial, vide a figura 3.6.



**FIGURA 3.6 – Preparação da solução de NaCl em água**

### **3.3 Determinação da vazão com que a 2ª camada é colocada sobre a 1ª e a 3ª sobre a 2ª assim como também os seus respectivos intervalos de tempo líquido gasto pelo método teórico e prático**

Teoricamente, a vazão foi calculada pela equação  $Q = A.v$ . Onde A é a área da secção transversal do orifício por onde a solução de cloreto de sódio da zona intermediária e zona de superfície deve passar, para que cada uma delas fique no seu respectivo lugar após ser colocada dentro da piscina solar e v é a velocidade de escoamento cujo valor é de 0,12m/s (constante), segundo TABOR, (1981), vide cálculos no Apêndice B.1 e, experimentalmente, tomamos um balde plástico de capacidade 10L e em seguida fizemos um furo de 2cm no centro de seu fundo a fim de adaptarmos um pedaço de cano de PVC de diâmetro 1,6 cm e comprimento 0,5 m. É lógico que tivemos de utilizar junta e vedadores para evitar vazamento. Logo em seguida, adaptamos uma torneira na parte inferior deste cano para controlar a vazão e em seguida adaptamos 1 m de cano PVC com as mesmas características do anterior na parte inferior da torneira, colocamos um tapan na parte inferior deste segundo cano e fizemos logo em seguida um furo de 5,3 mm lateralmente. Depois disto, tomamos uma proveta de capacidade 1000 mL, uma corda de manilha de comprimento 7 m, um cronômetro digital marca Medeiros, NF:8701 da MMECL, uma cadeira de assento e fomos para a passarela da frente do NUTENGE, penduramos o referido balde através da corda de manilha que foi amarrada numa coluna, colocamos determinada quantidade de solução (NaCl) correspondente à segunda camada dentro do balde e iniciamos a operação, vide figura 3.7, com o objetivo de encontrar uma determinada posição da torneira e marcarmos na mesma com fita isolante, quando atingíssemos a respectiva vazão que é numericamente igual a 2,65 mL/s, vide cálculo Apêndice B.1.2.



**FIGURA 3.7 – Determinação da vazão**

### **3.4 Enchimento da piscina solar**

A piscina é cheia em camadas sucessivas, seccionadas uma após a outra, com cada camada tendo uma leve diferença na concentração de sal. A piscina é cheia do fundo para cima, com as camadas mais densas do fundo cheias primeiro e, sucessivamente, camadas mais leves flutuando sobre as camadas mais densas de baixo sem, contudo, superar o limite da taxa de velocidade na qual a piscina deve ser preenchida que é de 0,12 m/s para o fluxo de velocidade.

### 3.4.1 Colocação da 1ª camada



**FIGURA 3.8 – Colocação da 1ª camada**

### 3.4.2 Colocação da 2ª e 3ª camada

Para podermos colocar a 2ª e 3ª camada, foi necessário fazermos a seguinte astúcia: Fomos ao matagal próximo onde foi instalada a piscina, conforme mostra figura 6.10, utilizando um facão rabo de galo, tiramos 03 caibos de madeira e enfincamos 02 deles no chão em volta da piscina, o 3ª caibo ficou como travessa horizontal e foi amarrado pelas suas extremidade por fios condutor isolado. Em seguida, amarramos também com fio condutor isolado uma roldana fixa no centro da travessa e depois passamos a corda de manilha pela roldana fixa com a finalidade de pendurarmos o balde e começarmos a colocar a 2ª camada. Para isto, foi preciso que o balde dependurado fosse cheio gradativamente utilizando-se 01 Becker de 500 mL, em seguida colocamos o berço do orifício de diâmetro 5,3 mm tangenciando a 1ª camada e abrimos a torneira logo em seguida. À medida que o nível de solução da 2ª camada foi subindo gradativamente, tínhamos que puxar a corda para baixo, sempre havendo interrupção, por isto é que falamos em tempo líquido quando

determinamos a vazão, isto é, na realidade o tempo gasto para colocarmos a 2ª e 3ª camada é bem maior do que o valor que foi calculado no Apêndice B.2, que são: 2h 50min 25seg para a camada  $Z_i$  e 28min 24seg para a camada  $Z_s$ , porque temos que levarmos em consideração as interrupções. O procedimento para colocarmos a 3ª camada é o mesmo da 2ª. Após colocarmos a última camada, tínhamos que retirar os 02 caibos enfiados no chão, assim como também a travessa, para evitarmos sombra sobre a piscina durante a sua absorção de radiação solar. Vide figuras 3.9 e 3.10.



**FIGURA 3.9 – Colocação do sistema balde dependurado pela polia fixa**



**FIGURA 3.10 – Colocação da 2ª solução no balde através de um Becker**

### **3.5 Monitoramento da temperatura média de cada camada e também da temperatura ambiente**

Previamente, foram feitos 05 ranhuras igualmente espaçadas no borda da piscina, com uma lixadeira em forma de disco, com o objetivo de medirmos a temperatura de cada camada em 05 pontos diferentes e depois tirarmos a média aritmética. Assim o fizemos; estabelecemos o seguinte horário para o monitoramento da mesma, que foi das 8:00hs às 17:00h, dando um total de 9:00h de funcionamento sem interrupção. Para fazermos a coleta de dados de cada ensaio, elaboramos uma tabela no seguinte modelo, que se encontra no Apêndice F e esta foi preenchida com os seus respectivos valores de cada camada, assim como também a temperatura ambiente correspondente a um determinado dia. Foi esta tabela que deu origem às outras tabelas com os seus respectivos gráficos do presente trabalho. Esta tabela encontrava-se sempre numa prancheta e sobre ela repousava o termômetro digital para podermos olhar para o display e observarmos o respectivo valor da temperatura em um dado ponto de determinada camada e em seguida anotarmos na mesma. A temperatura ambiente foi medida utilizando a mesma sonda acoplada ao termômetro digital MT-505 e, com o display do mesmo protegido da radiação solar, assim como para efeito de segurança, utilizei também o mesmo termômetro digital MT-505, porém, agora acoplado em um termopar tipo - MTK-01, (Cromel , Alumel), assim como também um termômetro analógico de mercúrio que ficava todo tempo em cima de uma mesa de marca INCODERM-122191 com variação de -10°C a 110°C. Sempre começávamos a medir a partir da camada de superfície, ou seja, de cima para baixo, mergulhando a sonda em 5 pontos diferentes da mesma. Todas as vezes que iríamos mergulhar a sonda em 5 pontos diferentes da camada isolante (intermediária) e da de armazenamento, tínhamos que antes limpar a mesma da seguinte forma: mergulhávamos a sonda dentro de um tubo de 5 L contendo água doce, que ficava durante as medições no pé da piscina e depois enxugávamos com uma flanela bem limpa e seca. Vide figuras 3.11 a 3.14.



**FIGURA 3.11 – Medição da 1º camada**



**FIGURA 3.12 – Medição da 2º camada**



## CAPÍTULO IV

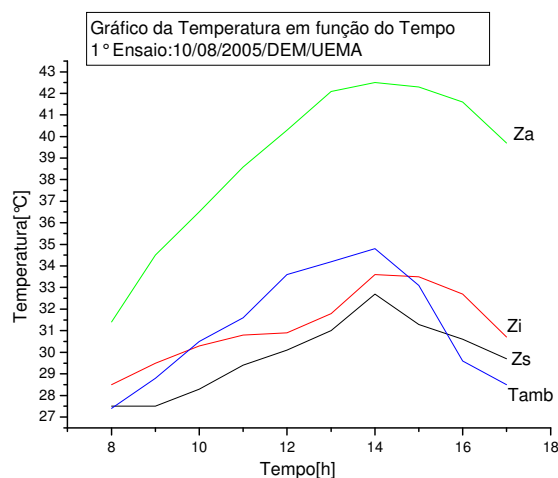
### RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

#### 4.1 1º Ensaio da piscina solar

O 1º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 27,5$  °C,  $T_{zi} = 28,5$  °C,  $T_{za} = 31,4$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 29,7$  °C,  $T_{zi} = 30,7$  °C e  $T_{za} = 39,7$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 8,3 °C, rendimento 9,05 % e temperatura média ambiental de 31,21 °C, com intervalo de confiabilidade [4,61 ; 7,31]% e [4,06 ; 6,70]°C, como mostra a tabela 4.1, gráfico 4.1 e Apêndices: D.1.10.2 e E.1.8.2.

**TABELA 4.1 – Dados do 1º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura $Z_s$<br>(°C) | Temperatura $Z_i$<br>(°C) | Temperatura $Z_a$<br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 8h      | 27,5                      | 28,5                      | 31,4                      | 27,4                   |
| 9h      | 27,5                      | 29,5                      | 34,5                      | 28,8                   |
| 10h     | 28,3                      | 30,3                      | 36,5                      | 30,5                   |
| 11h     | 29,4                      | 30,8                      | 38,6                      | 31,6                   |
| 12h     | 30,1                      | 30,9                      | 40,3                      | 33,6                   |
| 13h     | 31,0                      | 31,8                      | 42,1                      | 34,2                   |
| 14h     | 32,7                      | 33,6                      | 42,5                      | 34,8                   |
| 15h     | 31,3                      | 33,5                      | 42,3                      | 33,1                   |
| 16h     | 30,6                      | 32,7                      | 41,6                      | 29,6                   |
| 17h     | 29,7                      | 30,7                      | 39,7                      | 28,5                   |



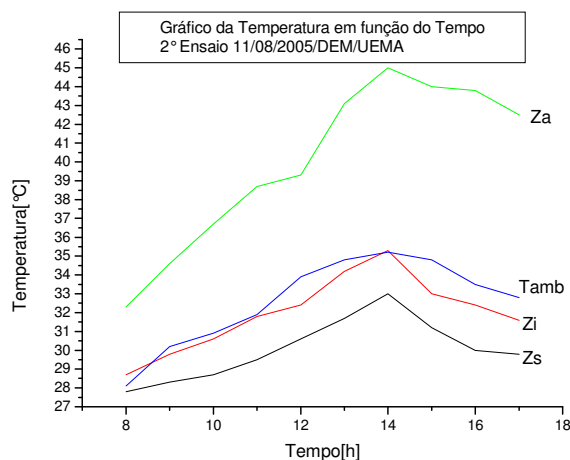
**FIGURA 4.1 – Gráfico do 1º ensaio da piscina solar**

#### 4.2 2º Ensaio da piscina solar

O 2º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 27,8$  °C,  $T_{zi} = 28,7$  °C,  $T_{za} = 32,3$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 29,8$  °C,  $T_{zi} = 31,6$  °C e  $T_{za} = 42,5$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 10,2 °C, rendimento 11,12 % e temperatura média ambiental de 32,61 °C, com intervalo de confiabilidade [6,80 ; 9,25]% e [6,24 ; 8,48]°C, como mostra a tabela 4.2, gráfico 4.2 e Apêndices: D.2.10.2 e E.2.8.2.

**TABELA 4.2 – Dados do 2º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura $Z_s$<br>(°C) | Temperatura $Z_i$<br>(°C) | Temperatura $Z_a$<br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 8h      | 27,8                      | 28,7                      | 32,3                      | 28,1                   |
| 9h      | 28,3                      | 29,8                      | 34,6                      | 30,2                   |
| 10h     | 28,7                      | 30,6                      | 36,7                      | 30,9                   |
| 11h     | 29,5                      | 31,8                      | 38,7                      | 31,9                   |
| 12h     | 30,6                      | 32,4                      | 39,3                      | 33,9                   |
| 13h     | 31,7                      | 34,2                      | 43,1                      | 34,8                   |
| 14h     | 33,0                      | 35,3                      | 45,0                      | 35,2                   |
| 15h     | 31,2                      | 33,0                      | 44,0                      | 34,8                   |
| 16h     | 30,0                      | 32,4                      | 43,8                      | 33,5                   |
| 17h     | 29,8                      | 31,6                      | 42,5                      | 32,8                   |



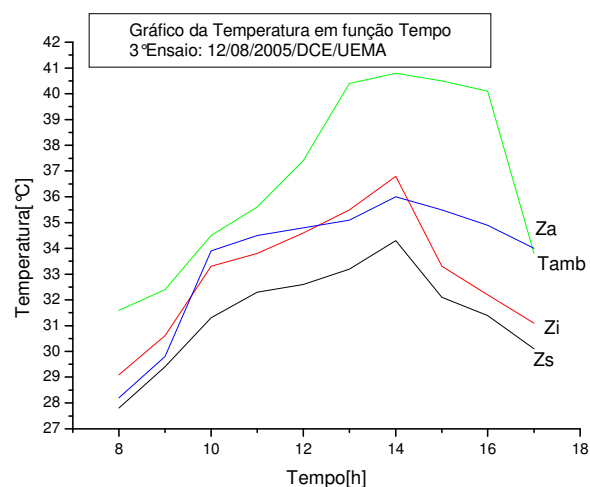
**FIGURA 4.2 – Gráfico do 2º ensaio da piscina solar**

#### 4.3 3º Ensaio da piscina solar

O 3º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 27,8$  °C,  $T_{zi} = 29,1$  °C,  $T_{za} = 31,6$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 30,1$  °C,  $T_{zi} = 31,1$  °C e  $T_{za} = 33,8$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 2,2 °C, rendimento 2,04 % e temperatura média ambiental de 33,67 °C, com intervalo de confiabilidade [4,17 ; 6,35]% e [3,77 ; 5,87]°C, como mostra a tabela 4.3, gráfico 4.3 e Apêndices: D.3.10.2 e E.3.8.2.

**TABELA 4.3 – Dados do 3º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura $Z_s$<br>(°C) | Temperatura $Z_i$<br>(°C) | Temperatura $Z_a$<br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 8h      | 27,8                      | 29,1                      | 31,6                      | 28,2                   |
| 9h      | 29,4                      | 30,6                      | 32,4                      | 29,8                   |
| 10h     | 31,3                      | 33,3                      | 34,5                      | 33,9                   |
| 11h     | 32,3                      | 33,6                      | 35,6                      | 34,5                   |
| 12h     | 32,6                      | 34,6                      | 37,4                      | 34,8                   |
| 13h     | 33,2                      | 35,5                      | 40,4                      | 35,1                   |
| 14h     | 34,3                      | 36,8                      | 40,8                      | 36,0                   |
| 15h     | 32,1                      | 33,3                      | 40,5                      | 35,5                   |
| 16h     | 31,4                      | 32,2                      | 40,1                      | 34,9                   |
| 17h     | 30,1                      | 31,1                      | 33,8                      | 34,0                   |



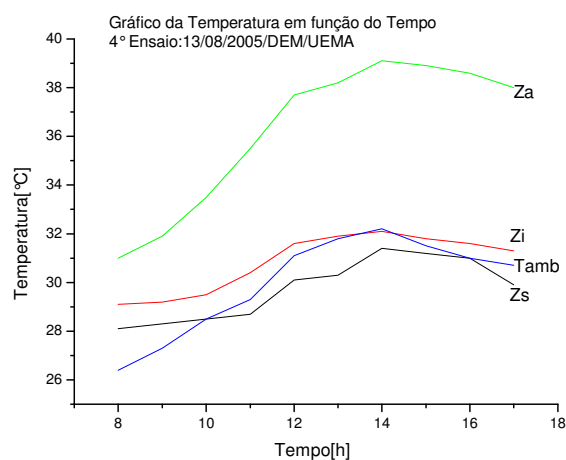
**FIGURA 4.3 – Gráfico do 3º ensaio da piscina solar**

#### 4.4 4º Ensaio da piscina solar

O 4º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 28,1$  °C,  $T_{zi} = 29,1$  °C,  $T_{za} = 31,0$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 29,9$  °C,  $T_{zi} = 31,3$  °C e  $T_{za} = 38,0$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 7,0 °C, rendimento 7,63 % e temperatura média ambiental de 29,98 °C, com intervalo de confiabilidade [3,80 ; 6,36]% e [3,27 ; 6,05]°C, como mostra a tabela 4.4, gráfico 4.4 e Apêndices: D.4.10.2 e E.4.8.2.

**TABELA 4.4 – Dados do 4º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura Z <sub>s</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>i</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>a</sub><br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 8h      | 28,1                               | 29,1                               | 31,1                               | 26,4                   |
| 9h      | 28,3                               | 29,2                               | 31,9                               | 27,3                   |
| 10h     | 28,5                               | 29,5                               | 33,5                               | 28,5                   |
| 11h     | 28,7                               | 30,4                               | 35,5                               | 29,3                   |
| 12h     | 30,1                               | 31,6                               | 37,7                               | 31,1                   |
| 13h     | 30,3                               | 31,9                               | 38,2                               | 31,8                   |
| 14h     | 31,4                               | 32,1                               | 39,1                               | 32,2                   |
| 15h     | 31,2                               | 31,8                               | 38,9                               | 31,5                   |
| 16h     | 31,0                               | 31,6                               | 38,6                               | 31,0                   |
| 17h     | 29,9                               | 31,3                               | 38,0                               | 30,7                   |



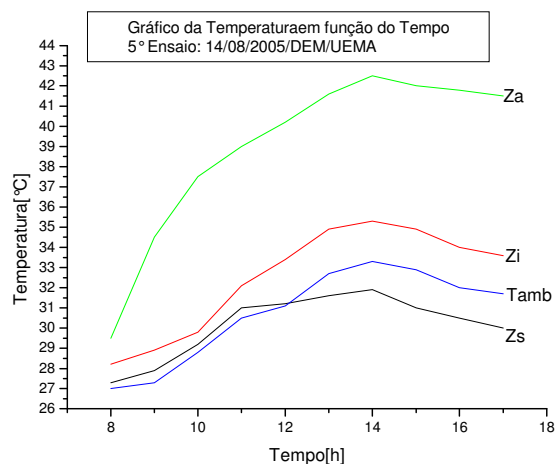
**FIGURA 4.4 – Gráfico do 4º ensaio da piscina solar**

#### 4.5 5º Ensaio da piscina solar

O 5º ensaio da piscina solar de gradiente salino foi realizado com a temperatura mínima de 29,50 °C e temperatura máxima de 41,50 °C, para a zona de armazenamento, proporcionando uma variação de temperatura de 12,00 °C e, conseqüentemente, o maior rendimento entre os 11 (onze) ensaios realizados, sendo da ordem de 13,09%, para uma temperatura média ambiente de 30,73 °C, com intervalo de confiança [4,26 ; 8,26]% e [3,91 ; 7,57]°C, como mostra a tabela 4.5, gráfico 4.5 e Apêndices: D.5.10.2 e E.5.8.2.

**TABELA 4.5 – Dados do 5º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura Z <sub>s</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>i</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>a</sub><br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 8h      | 27,3                               | 28,2                               | 29,5                               | 27,0                   |
| 9h      | 27,9                               | 28,9                               | 34,5                               | 27,3                   |
| 10h     | 29,2                               | 29,8                               | 37,5                               | 28,8                   |
| 11h     | 31,0                               | 32,1                               | 39,0                               | 30,5                   |
| 12h     | 31,2                               | 33,4                               | 40,2                               | 31,1                   |
| 13h     | 31,6                               | 34,9                               | 41,6                               | 32,7                   |
| 14h     | 31,9                               | 35,3                               | 42,5                               | 33,3                   |
| 15h     | 31,0                               | 34,9                               | 42,0                               | 32,9                   |
| 16h     | 30,5                               | 34,0                               | 41,8                               | 32,0                   |
| 17h     | 30,0                               | 33,6                               | 41,5                               | 31,7                   |



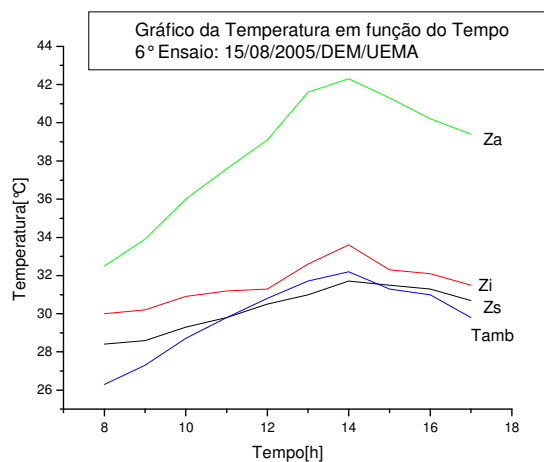
**FIGURA 4.5 – Gráfico do 5º ensaio da piscina solar**

#### 4.6 6º Ensaio da piscina solar

O 6º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 28,4$  °C,  $T_{zi} = 30,0$  °C,  $T_{za} = 32,5$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 30,7$  °C,  $T_{zi} = 31,5$  °C e  $T_{za} = 39,4$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 6,9 °C, rendimento 7,52 % e temperatura média ambiental de 29,89 °C, com intervalo de confiabilidade [4,77 ; 6,43]% e [4,36 ; 5,88]°C, como mostra a tabela 4.6, gráfico 4.6 e Apêndices: D.6.10.2 e E.6.8.2.

**TABELA 4.6 – Dados do 6º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura $Z_s$<br>(°C) | Temperatura $Z_i$<br>(°C) | Temperatura $Z_a$<br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 8h      | 28,4                      | 30,0                      | 32,5                      | 26,3                   |
| 9h      | 28,6                      | 30,2                      | 33,9                      | 27,3                   |
| 10h     | 29,3                      | 30,9                      | 36,0                      | 28,7                   |
| 11h     | 29,8                      | 31,2                      | 37,6                      | 29,8                   |
| 12h     | 30,5                      | 31,3                      | 39,1                      | 30,8                   |
| 13h     | 31,0                      | 32,6                      | 41,6                      | 31,7                   |
| 14h     | 31,7                      | 33,6                      | 42,3                      | 32,2                   |
| 15h     | 31,5                      | 32,3                      | 41,3                      | 31,3                   |
| 16h     | 31,3                      | 32,1                      | 40,2                      | 31,0                   |
| 17h     | 30,7                      | 31,5                      | 39,4                      | 29,8                   |



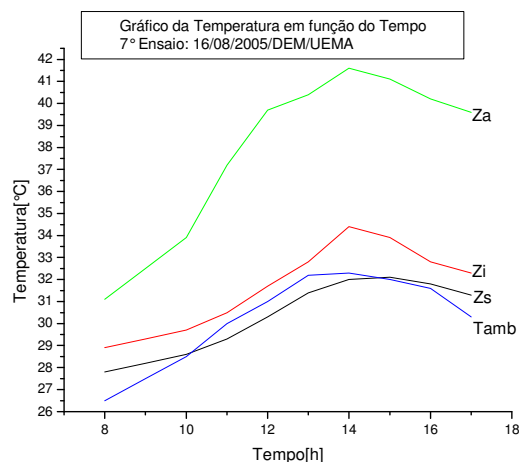
**FIGURA 4.6 – Gráfico do 6º ensaio da piscina solar**

#### 4.7 7º Ensaio da piscina solar

O 7º ensaio da piscina solar de gradiente salino foi realizado com a temperatura mínima de 31,10 °C e temperatura máxima de 39,60 °C, para a zona de armazenamento, proporcionando uma variação de temperatura na ordem de 8,50 °C e rendimento de 9,27%, para temperatura média ambiente de 30,19 °C, com intervalo de confiabilidade [4,53 ; 7,95]% e [4,27 ; 7,13]°C, como mostra a tabela 4.7, gráfico 4.7 e Apêndices: D.7.10.2 e E.7.8.2.

**TABELA 4.7 – Dados do 7º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura Z <sub>s</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>i</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>a</sub><br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 8h      | 27,8                               | 28,9                               | 31,1                               | 26,5                   |
| 9h      | 28,2                               | 29,3                               | 32,5                               | 27,5                   |
| 10h     | 28,6                               | 29,7                               | 33,9                               | 28,5                   |
| 11h     | 29,3                               | 30,5                               | 37,2                               | 30,0                   |
| 12h     | 30,3                               | 31,7                               | 39,7                               | 31,0                   |
| 13h     | 31,4                               | 32,8                               | 40,4                               | 32,2                   |
| 14h     | 32,0                               | 34,4                               | 41,6                               | 32,3                   |
| 15h     | 32,1                               | 33,9                               | 41,1                               | 32,0                   |
| 16h     | 31,8                               | 32,8                               | 40,2                               | 31,6                   |
| 17h     | 31,3                               | 32,3                               | 39,6                               | 30,3                   |



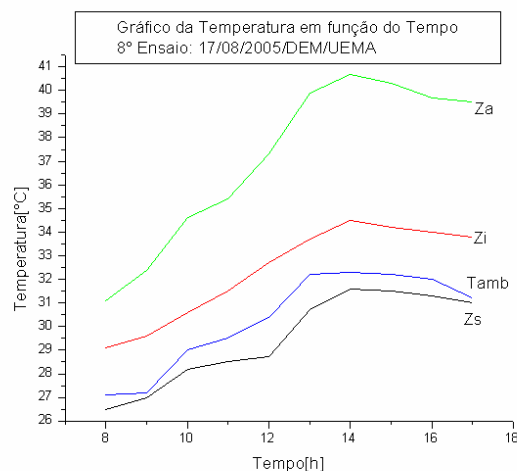
**FIGURA 4.7 – Gráfico do 7º ensaio da piscina solar**

#### 4.8 8º Ensaio da piscina solar

O 8º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 26,5$  °C,  $T_{zi} = 29,1$  °C,  $T_{za} = 31,1$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 31,0$  °C,  $T_{zi} = 33,8$  °C e  $T_{za} = 39,5$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 8,4 °C, rendimento 9,16 % e temperatura média ambiental de 30,3 °C, com intervalo de confiabilidade [5,35 ; 7,43]% e [4,88 ; 6,84]°C, como mostra a tabela 4.8, gráfico 4.8 e Apêndices: D.8.10.2 e E.8.8.2.

**TABELA 4.8 – Dados do 8º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura $Z_s$<br>(°C) | Temperatura $Z_i$<br>(°C) | Temperatura $Z_a$<br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 8h      | 26,5                      | 29,1                      | 31,1                      | 27,1                   |
| 9h      | 27,0                      | 29,6                      | 32,4                      | 27,2                   |
| 10h     | 28,2                      | 30,6                      | 34,6                      | 29,0                   |
| 11h     | 28,5                      | 31,5                      | 35,4                      | 29,5                   |
| 12h     | 28,7                      | 32,7                      | 37,3                      | 30,4                   |
| 13h     | 30,7                      | 33,7                      | 39,9                      | 32,2                   |
| 14h     | 31,6                      | 34,5                      | 40,7                      | 32,3                   |
| 15h     | 31,5                      | 34,2                      | 40,3                      | 32,2                   |
| 16h     | 31,3                      | 34,0                      | 39,7                      | 32,0                   |
| 17h     | 31,0                      | 33,8                      | 39,5                      | 31,2                   |



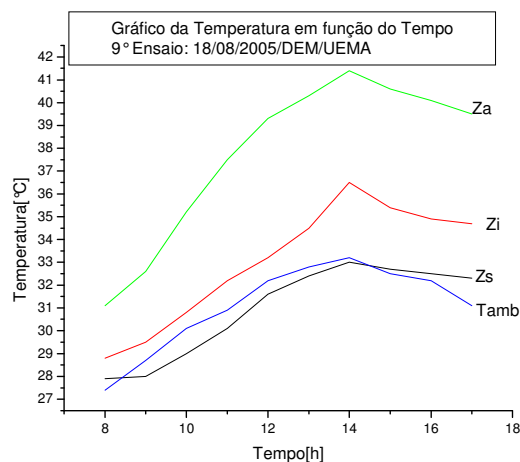
**FIGURA 4.8 – Gráfico do 8º ensaio da piscina**

#### 4.9 9º Ensaio da piscina solar

O 9º ensaio da piscina solar de gradiente salino foi realizado com a temperatura mínima de 31,10 °C e temperatura máxima de 39,50 °C, para a zona de armazenamento, proporcionando uma variação de temperatura na ordem de 8,40 °C e rendimento de 9,16%, para temperatura média ambiente de 31,11 °C, com intervalo de confiabilidade [4,27 ; 7,15]% e [3,92 ; 6,57]°C, como mostra a tabela 4.9, gráfico 4.9 e Apêndices: D.9.10.2 e E.9.8.2.

**TABELA 4.9 – Dados do 9º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura Z <sub>s</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>i</sub><br>(°C) | Temperatura Z <sub>a</sub><br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 8h      | 27,9                               | 28,8                               | 31,1                               | 27,4                   |
| 9h      | 28,0                               | 29,5                               | 32,6                               | 28,7                   |
| 10h     | 29,0                               | 30,8                               | 35,2                               | 30,1                   |
| 11h     | 30,1                               | 32,2                               | 37,5                               | 30,9                   |
| 12h     | 31,6                               | 33,2                               | 39,3                               | 32,2                   |
| 13h     | 32,4                               | 34,5                               | 40,3                               | 32,8                   |
| 14h     | 33,0                               | 36,5                               | 41,4                               | 33,2                   |
| 15h     | 32,7                               | 35,4                               | 40,6                               | 32,5                   |
| 16h     | 32,5                               | 34,9                               | 40,1                               | 32,2                   |
| 17h     | 32,3                               | 34,7                               | 39,5                               | 31,1                   |



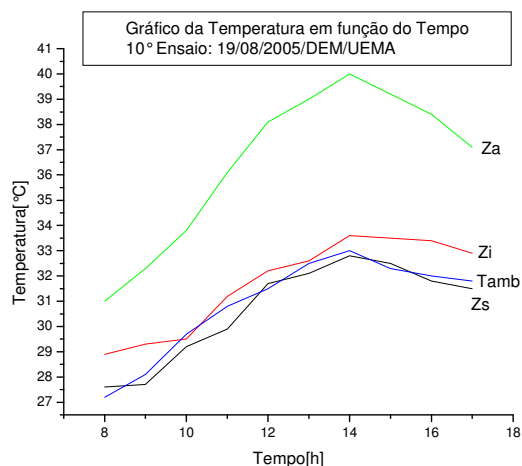
**FIGURA 4.9 – Gráfico do 9º ensaio da piscina solar**

#### 4.10 10º Ensaio da piscina solar

O 10º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 27,6$  °C,  $T_{zi} = 28,9$  °C,  $T_{za} = 31,0$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 31,5$  °C,  $T_{zi} = 32,9$  °C e  $T_{za} = 37,1$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 6,1 °C, rendimento 6,65 % e temperatura média ambiental de 30,9 °C, com intervalo de confiabilidade [3,82 ; 5,94]% e [3,50 ; 5,46]°C, como mostra a tabela 4.10, gráfico 4.10 e Apêndices: D.10.10.2 e E.10.8.2.

**TABELA 4.10 – Dados do 10º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura $Z_s$<br>(°C) | Temperatura $Z_i$<br>(°C) | Temperatura $Z_a$<br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 8h      | 27,6                      | 28,9                      | 31,0                      | 27,2                   |
| 9h      | 27,7                      | 29,3                      | 32,3                      | 28,1                   |
| 10h     | 29,2                      | 29,5                      | 33,8                      | 29,7                   |
| 11h     | 29,9                      | 31,2                      | 36,1                      | 30,8                   |
| 12h     | 31,7                      | 32,2                      | 38,1                      | 31,5                   |
| 13h     | 32,1                      | 32,6                      | 39,0                      | 32,5                   |
| 14h     | 32,8                      | 33,6                      | 40,0                      | 33,0                   |
| 15h     | 32,5                      | 33,5                      | 39,2                      | 32,3                   |
| 16h     | 31,8                      | 33,4                      | 38,4                      | 32,0                   |
| 17h     | 31,5                      | 32,9                      | 37,1                      | 31,8                   |



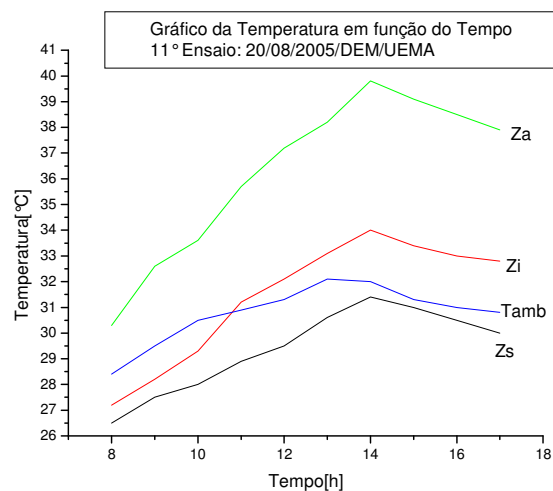
**FIGURA 4.10 – Gráfico do 10º ensaio da piscina solar**

#### 4.11 11º Ensaio da piscina solar

O 11º ensaio da piscina solar foi realizado com as temperaturas mínimas  $T_{zs} = 26,5$  °C,  $T_{zi} = 27,2$  °C,  $T_{za} = 30,3$  °C e as temperaturas máximas  $T_{zs} = 30,0$  °C,  $T_{zi} = 32,8$  °C e  $T_{za} = 37,9$  °C, proporcionando uma variação de temperatura na zona de armazenamento de 7,6 °C, rendimento 8,29 % e temperatura média ambiental de 30,7 °C, com intervalo de confiabilidade [4,06 ; 6,46]% e [3,72 ; 5,92]°C, como mostra a tabela 4.11, gráfico 4.11 e Apêndices: D.11.10.2 e E.11.8.2.

**TABELA 4.11 – Dados do 11º ensaio da piscina solar**

| Horário | Temperatura $Z_s$<br>(°C) | Temperatura $Z_i$<br>(°C) | Temperatura $Z_a$<br>(°C) | Temp. Ambiente<br>(°C) |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 8h      | 26,5                      | 27,2                      | 30,3                      | 28,4                   |
| 9h      | 27,5                      | 28,2                      | 32,6                      | 29,5                   |
| 10h     | 28,0                      | 29,3                      | 33,6                      | 30,5                   |
| 11h     | 28,9                      | 31,2                      | 35,7                      | 30,9                   |
| 12h     | 29,5                      | 32,1                      | 37,2                      | 31,3                   |
| 13h     | 30,6                      | 33,1                      | 38,2                      | 32,1                   |
| 14h     | 31,4                      | 34,0                      | 39,8                      | 32,0                   |
| 15h     | 31,0                      | 33,4                      | 39,1                      | 31,3                   |
| 16h     | 30,5                      | 33,0                      | 38,5                      | 31,0                   |
| 17h     | 30,0                      | 32,8                      | 37,9                      | 30,6                   |



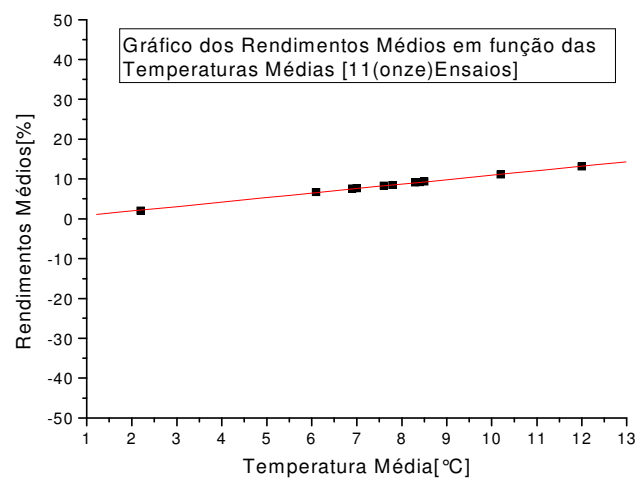
**FIGURA 4.11 – Gráfico do 11º ensaio da piscina solar**

#### 4.12 Temperaturas e rendimentos médios dos 11 ensaios

A tabela 4.12 mostra os dados das temperaturas médias e dos rendimentos médios da zona de armazenamento durante os 11 ensaios, gerando o gráfico 4.12. O rendimento em função da temperatura é uma função linear, como mostra o gráfico 4.12.

**TABELA 4.12 – Temperaturas e rendimentos médios**

| Ensaio | $\Delta T$ (°C) | $\eta$ (%) |
|--------|-----------------|------------|
| 1º     | 8,30            | 9,05       |
| 2º     | 10,20           | 11,12      |
| 3º     | 2,20            | 2,04       |
| 4º     | 7,00            | 7,63       |
| 5º     | 12,00           | 13,09      |
| 6º     | 6,90            | 7,52       |
| 7º     | 8,50            | 9,27       |
| 8º     | 8,40            | 9,16       |
| 9º     | 8,40            | 9,16       |
| 10º    | 6,10            | 6,65       |
| 11º    | 7,60            | 8,29       |
| MÉDIA  | 7,80            | 8,40       |



**FIGURA 4.12 – Gráfico dos rendimentos médios em função das temperaturas médias (11 ensaios)**

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSÃO E SUGESTÃO**

#### **5.1 Conclusão**

Mostra-se possível a contribuição relativamente simples da piscina solar de gradiente salino, utilizando a energia solar como fonte de energia térmica. Os resultados obtidos teoricamente encontram-se em concordância com resultados experimentais, possibilitando dessa maneira a construção e utilização do sistema. Um avanço alcançado por este trabalho é permitir que a temperatura média da zona de superfície se encontre hora totalmente abaixo da temperatura ambiente, num intervalo de tempo considerável, e a temperatura da zona de armazenamento apresente uma variação média de  $7,77^{\circ}\text{C}$ , vide Apêndice E.12.1.1, possibilitando realizar uma análise da eficiência da piscina solar de gradiente salino, no valor máximo, da ordem de 13,1%, vide Apêndice C.1.5.1. A avaliação das contribuições do presente trabalho, como uma das formas de obter uma outra forma de energia, só pode ser feita no decorrer de sua utilização. No presente trabalho, além de atingirmos os objetivos iniciais, chegamos às seguintes conclusões:

- a) A temperatura de pico, sempre ocorreu as 14:00h ao longo dos 11 (onze) dias de Ensaio;
- b) Dos 11 (onze) ensaios, a maior variação da temperatura média, ocorreu no 5º ensaio;
- c) A discrepância de temperatura apresentada entre os cinco (05) pontos de qualquer zona, para 11 (onze) ensaios, sempre correspondeu a valores compatíveis com a teoria;

- d) A temperatura média, de qualquer camada e a ambiente, só começava a decrescer após 1hr a insolação solar ter atingido o seu valor máximo que ocorre às 13:00hrs.

## **5.2 Sugestões de continuidade do trabalho**

Evidentemente que este trabalho deixou de abordar vários aspectos relevantes, e abriu novas questões que poderão e deverão ser objetos de estudos posteriores. Algumas destas questões estão citadas abaixo:

- a) Para aumentar a eficiência do Sistema do Presente Trabalho, propõe-se melhorar o isolamento, da piscina solar de gradiente salino
- b) Estudo da eficiência da piscina solar de gradiente salino, do Presente Trabalho, com a concentração de sal de cloreto de magnésio  $[MgCl_2]$
- c) Estudo das variações de temperatura na zona de superfície, zona intermediária e zona de armazenamento, para as respectivas concentrações de NaCl, 7,5%, 15% e 30% e comparar os resultados com a PSGS do presente trabalho;
- d) Como desenvolvimento de trabalho complementar, propõe-se analisar a eficiência da piscina solar de gradiente salino, do presente trabalho, construída abaixo do solo em nível com a superfície do mesmo.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

### A.1 Determinação da constante k

Segundo JORGE, (2001), temos que:

$$k = \frac{D_i}{h_n} \quad \text{A.1.1}$$

Substituindo os valores de  $D_i$  e  $h_n$ , respectivamente, por 50 cm e 23 cm, na equação A.1.1, temos:

$$k = \frac{50\text{cm}}{23\text{cm}} \Rightarrow k = 2,17 \Rightarrow k \cong 2 \quad \text{A.1.2}$$

### A.2 Determinação da área da piscina ( $A'$ )

Por definição, a área de um círculo é dada por:

$$A' = \pi \cdot r^2 \Rightarrow A' = \pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \quad \text{A.2.1}$$

Substituindo os valores de  $D_i$  por 50 cm e  $\pi$  por 3,141516, na equação A.2.1, temos:

$$A' = 3,141516 \cdot \frac{(50\text{cm})^2}{4} \Rightarrow A' = 1963,4375\text{cm}^2 \quad \text{A.2.2}$$

### **A.3 Determinação da altura das zonas: de armazenamento ( $h_{za}$ ), intermediária ( $h_{zi}$ ) e de superfície ( $h_{zs}$ )**

Segundo JORGE, (2001), temos que:

$$h_{za} = \frac{3}{10} \cdot h \quad \text{A.3.1}$$

$$h_{zi} = 2 \cdot h_{za} \quad \text{A.3.2}$$

$$h_{zs} = \frac{1}{3} \cdot h_{za} \quad \text{A.3.3}$$

Substituindo o valor de  $h$  por 23 cm, na equação A.3.1, temos:

$$h_{za} = \frac{3}{10} \cdot 23 \text{ cm} \Rightarrow h_{za} = 6,90 \text{ cm} \quad \text{A.3.4}$$

$$h_{zi} = 2 \cdot 6,90 \text{ cm} \Rightarrow h_{zi} = 13,80 \text{ cm} \quad \text{A.3.5}$$

$$h_{zs} = \frac{1}{3} \cdot 6,90 \text{ cm} \Rightarrow h_{zs} = 2,30 \text{ cm} \quad \text{A.3.6}$$

### **A.4 Determinação do volume das zonas: de armazenamento ( $V_{za}$ ), intermediária ( $V_{zi}$ ) e de superfície ( $V_{zs}$ )**

Por definição, o volume de um cilindro é dado por:

$$V = A' \cdot h_n \quad (\text{Da Geometria Espacial}) \quad \text{A.4.1}$$

Substituindo os valores de  $A$  por  $1963,4375 \text{ cm}^2$  e os valores das alturas  $h_{za}$ ,  $h_{zi}$  e  $h_{zs}$ , respectivamente, por 6,90 cm, 13,80 e 2,30 cm, na equação A.4.1, temos:

$$V_{za} = 1963,4375 \text{ cm}^2 \cdot 6,90 \text{ cm} \Rightarrow V_{za} = 13547,7188 \text{ cm}^3 \quad \text{A.4.2}$$

$$V_{zi} = 1963,4375 \text{ cm}^2 \cdot 13,80 \text{ cm} \Rightarrow V_{zi} = 27095,4375 \text{ cm}^3 \quad \text{A.4.3}$$

$$V_{zs} = 1963,4375 \text{ cm}^2 \cdot 2,30 \text{ cm} \Rightarrow V_{zs} = 4515,9063 \text{ cm}^3 \quad \text{A.4.4}$$

#### **A.5 Determinação da massa do soluto das zonas: de armazenamento ( $m_{\text{solute za}}$ ), intermediária ( $m_{\text{solute zi}}$ ) e de superfície ( $m_{\text{solute zs}}$ )**

Por definição, o gradiente de densidade do soluto é dado por:

$$\nabla_{\mu} = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \nabla_{\mu} \cdot V \quad (\text{Da Hidrostática}) \text{ HALLIDAY, (1996)} \quad \text{A.5.1}$$

Substituindo o valor de  $\nabla_{\mu}$ , segundo JORGE, (2001), por 200 g/L, 100 g/L e 50 g/L, respectivamente, para as os valores de  $\nabla_{\mu za}$ ,  $\nabla_{\mu zi}$  e  $\nabla_{\mu zs}$ , e o valor de V por 13,55 L, 27,10 L e 4,52 L, respectivamente, para os valores de  $V_{za}$ ,  $V_{zi}$  e  $V_{zs}$ , na equação A.5.1, temos:

$$m_{\text{solute za}} = 200 \frac{\text{g}}{\text{L}} \cdot 13,55 \text{ L} \Rightarrow m_{\text{solute za}} = 2,710 \text{ kg} \quad \text{A.5.2}$$

$$m_{\text{solute zi}} = 100 \frac{\text{g}}{\text{L}} \cdot 27,10 \text{ L} \Rightarrow m_{\text{solute zi}} = 2,710 \text{ kg} \quad \text{A.5.3}$$

$$m_{\text{solute zs}} = 50 \frac{\text{g}}{\text{L}} \cdot 4,52 \text{ L} \Rightarrow m_{\text{solute zs}} = 0,2258 \text{ kg} \quad \text{A.5.4}$$

#### **A.6 Determinação da massa do solvente (água doce) das zonas: de armazenamento ( $m_{\text{solvente za}}$ ), intermediária ( $m_{\text{solvente zi}}$ ) e de superfície ( $m_{\text{solvente zs}}$ )**

Por definição, a densidade do solvente é dada por:

$$\mu = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \mu \cdot V \quad (\text{Da Hidrostática}) \text{ HALLIDAY, (1996)} \quad \text{A.6.1}$$

Substituindo o valor de  $\mu$  por  $1 \text{ g/cm}^3$  e o valor de  $V$  por  $13547,7188 \text{ cm}^3$ ,  $27095,4375 \text{ cm}^3$  e  $4515,9063 \text{ cm}^3$ , respectivamente, para os valores de  $V_{za}$ ,  $V_{zi}$  e  $V_{zs}$ , na equação A.6.1, temos:

$$m_{\text{solvente za}} = 1,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 13547,7188 \text{ cm}^3 \Rightarrow m_{\text{solvente za}} = 13,55 \text{ kg} \quad \text{A.6.2}$$

$$m_{\text{solvente zi}} = 1,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 27095,4375 \text{ cm}^3 \Rightarrow m_{\text{solvente zi}} = 27,10 \text{ kg} \quad \text{A.6.3}$$

$$m_{\text{solvente zs}} = 1,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 4515,9063 \text{ cm}^3 \Rightarrow m_{\text{solvente zs}} = 4,52 \text{ kg} \quad \text{A.6.4}$$

#### **A.7 Determinação da titulação da solução de cloreto de sódio (NaCl) das zonas: de armazenamento ( $\tau_{za}$ ), intermediária ( $\tau_{zi}$ ) e de superfície ( $\tau_{zs}$ )**

Por definição, a titulação da solução é dada por:

$$\tau = \frac{m_{\text{solute}}}{m_{\text{solvente}}} \cdot 100 \% \quad (\text{Da Físico-Química}) \text{ FELTRE, (1974)} \quad \text{A.7.1}$$

Substituindo o valor de  $m_{\text{solute}}$  por  $2,710 \text{ kg}$ ,  $2,710 \text{ kg}$  e  $0,2258 \text{ kg}$ , respectivamente, para os valores de  $m_{\text{solute za}}$ ,  $m_{\text{solute zi}}$  e  $m_{\text{solute zs}}$ , e o valor de  $m_{\text{solvente}}$  por  $13,55 \text{ kg}$ ,  $27,10 \text{ kg}$  e  $4,52 \text{ kg}$ , respectivamente, para os valores de  $m_{\text{solvente za}}$ ,  $m_{\text{solvente zi}}$  e  $m_{\text{solvente zs}}$ , na equação A.7.1, temos:

$$\tau_{za} = \frac{2,710 \text{ kg}}{13,55 \text{ kg}} \cdot 100 \% \Rightarrow \tau_{za} = 20 \% \quad \text{A.7.2}$$

$$\tau_{zi} = \frac{2,710 \text{ kg}}{27,10 \text{ kg}} \cdot 100 \% \Rightarrow \tau_{zi} = 10 \% \quad \text{A.7.3}$$

$$\tau_{zs} = \frac{0,2258 \text{ kg}}{4,52 \text{ kg}} \cdot 100 \% \Rightarrow \tau_{zs} = 5 \% \quad \text{A.7.4}$$

## APÊNDICE B

### B.1 Determinação da vazão (Q) para colocação da solução de cloreto de sódio (NaCl) nas zonas intermediária e de superfície

Por definição, vazão é dada por:

$$Q = A_o \cdot v \Rightarrow Q = \pi \cdot \frac{D_o^2}{4} \cdot v \quad (\text{Da Hidrodinâmica}) \quad \text{B.1.1}$$

Substituindo o valor de  $v$ , segundo (TABOR, 1981), pelo valor constante e igual a 0,12 m/s, velocidade de escoamento utilizada em ambas as zonas intermediária e de superfície, o valor de  $D_o$  por 0,53 cm e  $\pi$  por 3,141516, na equação B.1.1, temos:

$$Q = 3,141516 \cdot \frac{(0,0053 \text{ m})^2}{4} \cdot 0,12 \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow Q = 2,65 \frac{\text{mL}}{\text{s}} \quad \text{B.1.2}$$

### B.2 Determinação do intervalo de tempo líquido para a colocação da solução de cloreto de sódio (NaCl) nas zonas: intermediária ( $\Delta t_{zi}$ ) e de superfície ( $\Delta t_{zs}$ )

Por definição, o intervalo de tempo, relacionado à vazão de uma solução, é dada por:

$$\Delta t = \frac{V}{Q} \quad (\text{Da Hidrodinâmica}) \quad \text{B.2.1}$$

Substituindo o valor de  $V$  por 27095,4375 mL e 4515,9063 mL, respectivamente, para os valores  $V_{zi}$  e  $V_{zs}$ , e o valor de  $Q$  por 2,65 mL/s, na equação B.2.1, temos:

$$\Delta t_{zi} = \frac{27095,4375 \text{ mL}}{2,65 \text{ mL/s}} \Rightarrow \Delta t_{zi} = 10224,69 \text{ s} \Rightarrow \Delta t_{zi} = 2 \text{ hr } 50 \text{ min } 25 \text{ seg} \quad \text{B.2.2}$$

$$\Delta t_{zs} = \frac{4515,9063 \text{ mL}}{2,65 \text{ mL/s}} \Rightarrow \Delta t_{zs} = 1704,12 \text{ s} \Rightarrow \Delta t_{zs} = 28 \text{ min } 24 \text{ seg} \quad \text{B.2.3}$$

## APÊNDICE C

### C.1 Determinação do rendimento equivalente médio da piscina solar de gradiente salino para os 11 (onze) ensaios

O rendimento foi determinado pela equação 2.44, do presente trabalho, logo:

$$\eta = \tau \cdot h_d - U \cdot \frac{\theta_d}{H_p} \quad \text{C.1.1}$$

Considerando  $\tau$  desprezível (coeficiente de transmissão), ou seja, as perdas por reflexão igual a zero, então temos:

$$\eta = 0 \cdot h_d - U \cdot \frac{\theta_d}{H_p} \Rightarrow \eta = -U \cdot \frac{\theta_d}{H_p} \quad \text{C.1.2}$$

Porém, de acordo com a equação 2.41, do presente trabalho, temos que:

$$U = -\frac{m' \cdot c_p \cdot \Delta T}{\theta_d \cdot A' \cdot \Delta t} \quad \text{C.1.3}$$

Substituindo a equação C.1.3 em C.1.2, temos que:

$$\begin{aligned} \eta &= -\left(-\frac{m' \cdot c_p \cdot \Delta T}{\theta_d \cdot A' \cdot \Delta t}\right) \cdot \frac{\theta_d}{H_p} \Rightarrow \eta = \frac{m' \cdot c_p \cdot \Delta T}{\theta_d \cdot A' \cdot \Delta t} \cdot \frac{\theta_d}{H_p} \Rightarrow \eta = \frac{m' \cdot c_p \cdot \Delta T}{A' \cdot \Delta t} \cdot \frac{1}{H_p} \\ \eta &= \frac{m' \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}}{A' \cdot H_p} \Rightarrow \eta = \frac{P_u}{P_t} \end{aligned} \quad \text{C.1.4}$$

Substituindo os valores de  $m$ ,  $c_p$ ,  $\Delta t$ ,  $A'$  e  $H_p$ , temos:

$$\eta = \frac{16251,2 \text{ g} \cdot 3,57484 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \frac{\Delta T(^{\circ}\text{C})}{32400 \text{ s}}}{0,19634475 \text{ m}^2 \cdot 837,34 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \Rightarrow \eta = \frac{\frac{58095,43981 \text{ J}}{32400 \text{ s}} \cdot \Delta T}{164,412 \text{ W}}$$

$$\eta = \frac{1,79306913 \text{ W} \cdot \Delta T}{164,412 \text{ W}} \Rightarrow \eta = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{C.1.5}$$

O rendimento ( $\eta$ ) vai depender exclusivamente de  $\Delta T$ , de cada ensaio.

**C.1.1 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 1º ensaio, que foi realizado no dia 10/08/2005**

$$\eta_{1^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot (39,7 - 31,4) \Rightarrow \eta_{1^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot 8,3$$

$$\eta_{1^\circ \text{ensaio}} = 0,09051938 \quad \text{C.1.1.1}$$

Onde:  $T_0 = 31,4^\circ\text{C}$ , às 8h, e  $T = 39,7^\circ\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.2 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 2º ensaio, que foi realizado no dia 11/08/2005**

$$\eta_{2^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot (42,5 - 32,3) \Rightarrow \eta_{2^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot 10,2$$

$$\eta_{2^\circ \text{ensaio}} = 0,11124069 \quad \text{C.1.2.1}$$

Onde:  $T_0 = 32,3^\circ\text{C}$ , às 8h, e  $T = 42,5^\circ\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.3 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 3º ensaio, que foi realizado no dia 12/08/2005**

$$\eta_{3^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot (33,8 - 31,6) \Rightarrow \eta_{3^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot 2,2$$

$$\eta_{3^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,02399309 \quad \text{C.1.3.1}$$

Onde:  $T_0 = 31,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , às 8h, e  $T = 33,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.4 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 4º ensaio, que foi realizado no dia 13/08/2005**

$$\eta_{4^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot (38,0 - 31,0) \Rightarrow \eta_{4^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot 7,0$$

$$\eta_{4^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,07634165 \quad \text{C.1.4.1}$$

Onde:  $T_0 = 31,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , às 8h, e  $T = 38,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.5 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 5º ensaio, que foi realizado no dia 14/08/2005**

$$\eta_{5^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot (41,5 - 29,5) \Rightarrow \eta_{5^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot 12,0$$

$$\eta_{5^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,1308714 \quad \text{C.1.5.1}$$

Onde:  $T_0 = 29,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , às 8h, e  $T = 41,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.6 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 6º ensaio, que foi realizado no dia 15/08/2005**

$$\eta_{6^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot (39,4 - 32,5) \Rightarrow \eta_{6^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot 6,9$$

$$\eta_{6^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,075251055 \quad \text{C.1.6.1}$$

Onde:  $T_0 = 32,5^{\circ}\text{C}$ , às 8h, e  $T = 39,4^{\circ}\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.7 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 7º ensaio, que foi realizado no dia 16/08/2005**

$$\eta_{7^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot (39,6 - 31,1) \Rightarrow \eta_{7^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot 8,5$$

$$\eta_{7^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,092700575 \quad \text{C.1.7.1}$$

Onde:  $T_0 = 31,1^{\circ}\text{C}$ , às 8h, e  $T = 39,6^{\circ}\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.8 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 8º ensaio, que foi realizado no dia 17/08/2005**

$$\eta_{8^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot (39,5 - 31,1) \Rightarrow \eta_{8^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,01090595 \cdot 8,4$$

$$\eta_{8^{\circ} \text{ ensaio}} = 0,09160998 \quad \text{C.1.8.1}$$

Onde:  $T_0 = 31,1^{\circ}\text{C}$ , às 8h, e  $T = 39,5^{\circ}\text{C}$ , às 17 h.

**C.1.9 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 9º ensaio, que foi realizado no dia 18/08/2005**

$$\eta_{9^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot (39,5 - 31,1) \Rightarrow \eta_{9^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot 8,4$$

$$\eta_{9^\circ \text{ensaio}} = 0,09160998 \quad \text{C.1.9.1}$$

Onde:  $T_0 = 31,1^\circ \text{C}$ , às 8h, e  $T = 39,5^\circ \text{C}$ , às 17 h.

**C.1.10 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 10º ensaio, que foi realizado no dia 19/08/2005**

$$\eta_{10^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot (37,1 - 31,1) \Rightarrow \eta_{10^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot 6,1$$

$$\eta_{10^\circ \text{ensaio}} = 0,066526295 \quad \text{C.1.10.1}$$

Onde:  $T_0 = 31,0^\circ \text{C}$ , às 8h, e  $T = 37,1^\circ \text{C}$ , às 17 h.

**C.1.11 Determinação do rendimento da piscina solar correspondente ao 11º ensaio, que foi realizado no dia 20/08/2005**

$$\eta_{11^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot (37,9 - 30,3) \Rightarrow \eta_{11^\circ \text{ensaio}} = 0,01090595 \cdot 7,6$$

$$\eta_{11^\circ \text{ensaio}} = 0,08288522 \quad \text{C.1.11.1}$$

Onde:  $T_0 = 30,3^\circ \text{C}$ , às 8h, e  $T = 37,9^\circ \text{C}$ , às 17 h.

### C.1.12 Determinação do rendimento da piscina solar durante os 11 dias ou rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta \eta_i}{N} \quad \text{C.1.12.1}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{11} \Delta \eta_i &= 905,1938 \cdot 10^{-4} + 1112,4069 \cdot 10^{-4} + 239,9309 \cdot 10^{-4} + 763,4165 \cdot 10^{-4} + 1308,714 \cdot 10^{-4} + \\ &+ 752,51055 \cdot 10^{-4} + 927,00575 \cdot 10^{-4} + 916,0998 \cdot 10^{-4} + 916,0998 \cdot 10^{-4} + 665,26295 \cdot 10^{-4} + 828,8522 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{11} \Delta \eta_i = 9335,49315 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.12.2}$$

$$\bar{\eta} = \frac{9335,49315 \cdot 10^{-4}}{11} \Rightarrow \bar{\eta} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.12.3}$$

$$\bar{\eta} \cong 8,49 \% \quad \text{C.1.12.4}$$

### C.1.13 Determinação dos desvios de cada ensaio

$$\Delta \eta = \bar{\eta} - \eta_i \quad \text{C.1.13.1}$$

$$\Delta \eta_{1^\circ \text{ ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 905,1938 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{1^\circ \text{ ensaio}} = -56,51260455 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.2}$$

$$\Delta \eta_{2^\circ \text{ ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 1112,4069 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{2^\circ \text{ ensaio}} = -263,7257045 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.3}$$

$$\Delta \eta_{3^\circ \text{ ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 239,9309 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{3^\circ \text{ ensaio}} = 608,7502955 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.4}$$

$$\Delta \eta_{4^\circ \text{ ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 763,4165 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{4^\circ \text{ ensaio}} = 85,2646955 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.5}$$

$$\Delta \eta_{5^\circ \text{ ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 1308,714 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{5^\circ \text{ ensaio}} = -460,0328045 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.6}$$

$$\Delta \eta_{6^{\circ} \text{ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 752,51055 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{6^{\circ} \text{ensaio}} = 96,1706455 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.7}$$

$$\Delta \eta_{7^{\circ} \text{ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 927,00575 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{7^{\circ} \text{ensaio}} = -78,3245545 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.8}$$

$$\Delta \eta_{8^{\circ} \text{ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 916,0998 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{8^{\circ} \text{ensaio}} = -67,4186045 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.9}$$

$$\Delta \eta_{9^{\circ} \text{ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 916,0998 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{9^{\circ} \text{ensaio}} = -67,4186045 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.10}$$

$$\Delta \eta_{10^{\circ} \text{ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 665,26295 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{10^{\circ} \text{ensaio}} = 183,4182455 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.11}$$

$$\Delta \eta_{11^{\circ} \text{ensaio}} = 848,6811955 \cdot 10^{-4} - 828,8522 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_{11^{\circ} \text{ensaio}} = 19,8289955 \cdot 10^{-4} \quad \text{C.1.13.12}$$

#### C.1.14 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^N \Delta \eta_i = ? \quad \text{C.1.14.1}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{11} \Delta \eta_i &= -56,51260455 \cdot 10^{-4} + (-263,7257045 \cdot 10^{-4}) + 608,7502955 \cdot 10^{-4} + 85,2646955 \cdot 10^{-4} + \\ &+ (-460,0328045 \cdot 10^{-4}) + 96,1706455 \cdot 10^{-4} + (-78,3245545 \cdot 10^{-4}) + (-67,4186045 \cdot 10^{-4}) + \\ &+ (-67,4186045 \cdot 10^{-4}) + 183,4182455 \cdot 10^{-4} + 19,8289955 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad \text{C.1.14.2}$$

$$\sum_{i=1}^{11} \Delta \eta_i = 0 \quad \text{C.1.14.3}$$

#### C.1.15 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (\Delta \eta_i)^2 = ? \quad \text{C.1.15.1}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{11} \Delta \eta_i = & \left(-56,51260455 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(-263,7257045 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(608,7502955 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(85,2646955 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \\
& + \left(-460,0328045 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(96,1706455 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(-78,3245545 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(-67,4186045 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \\
& + \left(-67,4186045 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(183,4182455 \cdot 10^{-4}\right)^2 + \left(19,8289955 \cdot 10^{-4}\right)^2
\end{aligned} \tag{C.1.15.2}$$

$$\sum_{i=1}^{11} (\Delta \eta_i)^2 = 720731,6007 \cdot 10^{-8} \tag{C.1.15.3}$$

#### C.1.16 Determinação do desvio padrão

$$\delta \eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \eta_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \tag{C.1.16.1}$$

$$\delta \eta = \sqrt{\frac{720731,6007 \cdot 10^{-8}}{11 \cdot (11 - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{720731,6007}{110}}$$

$$\delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{6552,105461} \Rightarrow \delta \eta = 80,94507682 \cdot 10^{-4} \tag{C.1.16.2}$$

#### C.1.17 Determinação do desvio padrão relativo

$$\delta r \eta = \frac{\delta \eta}{\bar{\eta}} \tag{C.1.17.1}$$

$$\delta r \eta = \frac{80,94507682 \cdot 10^{-4}}{898,6811955 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r \eta = 0,095377483 \tag{C.1.17.2}$$

### C.1.18 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{p\eta} = \delta_{r\eta} \cdot 100 \% \quad \text{C.1.18.1}$$

$$\delta_{p\eta} = 0,095377483 \cdot 100 \% \quad \text{C.1.18.2}$$

### C.1.19 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$I_{\text{conf}} = (\bar{\eta} \pm \delta_{p\eta} \cdot \bar{\eta}) \quad \text{C.1.19.1}$$

$$E_i = 8,49 \% - 8,49 \% \cdot \frac{9,54}{100} \Rightarrow E_i = 8,49 \% - 0,81 \% \Rightarrow E_i = 7,68 \% \quad \text{C.1.19.2}$$

$$E_s = 8,49 \% + 0,81 \% \Rightarrow E_s = 9,3 \% \quad \text{C.1.19.3}$$

Logo, o intervalo de confiabilidade é:

$$I_{\text{conf}} = [7,68 \% ; 9,30 \%] \quad \text{C.1.19.4}$$

## APÊNDICE D

### D.1 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 1º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.1.1}$$

#### D.1.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de 8h a 17h} \Rightarrow \Delta T = 39,7 - 31,4 = 8,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.1.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de 9h a 16h} \Rightarrow \Delta T = 41,6 - 34,5 = 7,1 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.1.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de 10h a 15h} \Rightarrow \Delta T = 42,3 - 36,5 = 5,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.1.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de 11h a 14h} \Rightarrow \Delta T = 42,5 - 38,6 = 3,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.1.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de 12h a 13h} \Rightarrow \Delta T = 42,1 - 40,3 = 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.1.1.5}$$

#### D.1.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(8,3 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 8,3 = 0,09051938 = 9,05 \% \quad \text{D.1.2.1}$$

$$\eta(7,1 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,1 = 0,07743224 = 7,74 \% \quad \text{D.1.2.2}$$

$$\eta(5,8 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,8 = 0,06325451 = 6,32 \% \quad \text{D.1.2.3}$$

$$\eta(3,9 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 3,9 = 0,04253320 = 4,25 \% \quad \text{D.1.2.4}$$

$$\eta(1,8 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 1,8 = 0,01963071 = 1,96 \% \quad \text{D.1.2.5}$$

### D.1.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{905,1938 \cdot 10^{-4} + 774,324 \cdot 10^{-4} + 632,5451 \cdot 10^{-4} + 425,3320 \cdot 10^{-4} + 196,3071 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{2933,702 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 586,7404 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 5,87\% \quad \text{D.1.3.1}$$

### D.1.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 586,7404 \cdot 10^{-4} - 905,1938 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = -318,4534 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.1.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 586,7404 \cdot 10^{-4} - 774,3140 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -187,5836 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.1.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 586,7404 \cdot 10^{-4} - 632,5451 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -45,8047 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.1.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 586,7404 \cdot 10^{-4} - 425,3320 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 161,4084 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.1.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 586,7404 \cdot 10^{-4} - 196,3071 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 390,4333 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.1.4.5}$$

### D.1.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=5}^{N=5} \Delta\eta_i = -318,4534 \cdot 10^{-4} - 187,5836 \cdot 10^{-4} - 45,8047 \cdot 10^{-4} + 161,4084 \cdot 10^{-4} + 390,4333 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=5}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.1.5.1}$$

### D.1.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=5}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-318,4534 \cdot 10^{-4})^2 + (-187,5836 \cdot 10^{-4})^2 + (-45,8047 \cdot 10^{-4})^2 + (161,4084 \cdot 10^{-4})^2 + (390,4333 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=5}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 101412,568 \cdot 10^{-8} + 35187,60699 \cdot 10^{-8} + 1098,070542 \cdot 10^{-8} + 26052,67159 \cdot 10^{-8} + 152438,1617 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=5}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 317189,0789 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.1.6.1}$$

#### D.1.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta \eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \eta_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = \sqrt{\frac{317189,0789 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{317189,0789}{20}}$$

$$\delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{15859,45395} \Rightarrow \delta \eta = 125,9343239 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.1.7.1}$$

#### D.1.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r \eta = \frac{\delta r \eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r \eta = \frac{125,9343239 \cdot 10^{-4}}{586,7404 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r \eta = 0,21463395 \quad \text{D.1.8.1}$$

#### D.1.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p \eta = \delta r \eta \cdot 100 \%$$

$$\delta p \eta = 0,21463395 \cdot 100 \% \Rightarrow \delta p \eta \cong 21,46 \% \quad \text{D.1.9.1}$$

#### D.1.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 5,87 \% - 5,87 \% \cdot \frac{21,46}{100} \Rightarrow E_i = 5,87 \% - 1,26 \% \Rightarrow E_i = 4,61 \%$$

$$E_s = 5,87 \% + 1,26 \% \Rightarrow E_s = 7,13 \%$$

$$I_{\text{conf}} = [4,61 ; 7,13] \% \quad \text{D.1.10.1}$$

#### D.2 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 2º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.2.1}$$

##### D.2.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de } 8 \text{ h a } 17 \text{ h} \Rightarrow \Delta T = 42,5 - 32,3 = 10,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.2.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de } 9 \text{ h a } 16 \text{ h} \Rightarrow \Delta T = 43,8 - 34,6 = 9,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.2.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de } 10 \text{ h a } 15 \text{ h} \Rightarrow \Delta T = 44,0 - 36,7 = 7,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.2.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de } 11 \text{ h a } 14 \text{ h} \Rightarrow \Delta T = 45,0 - 38,7 = 6,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.2.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de } 12 \text{ h a } 13 \text{ h} \Rightarrow \Delta T = 43,1 - 39,3 = 3,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.2.1.5}$$

##### D.2.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(10,2 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 10,2 = 0,11124069 = 11,12 \% \quad \text{D.2.2.1}$$

$$\eta(9,2 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 9,2 = 0,10033474 = 10,03 \% \quad \text{D.2.2.2}$$

$$\eta(7,3^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,3 = 0,079613435 = 7,96\% \quad \text{D.2.2.3}$$

$$\eta(6,3^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 6,3 = 0,068707485 = 6,87\% \quad \text{D.2.2.4}$$

$$\eta(3,8^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 3,8 = 0,04144161 = 4,14\% \quad \text{D.2.2.5}$$

### D.2.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{1112,24069 \cdot 10^{-4} + 1003,33474 \cdot 10^{-4} + 796,13435 \cdot 10^{-4} + 687,07485 \cdot 10^{-4} + 414,4861 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{4013,21073 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 802,642146 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 8,03\% \quad \text{D.2.3.1}$$

### D.2.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 802,642146 \cdot 10^{-4} - 1112,24069 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = -309,598544 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.2.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 802,642146 \cdot 10^{-4} - 1003,33474 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -200,692594 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.2.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 802,642146 \cdot 10^{-4} - 796,13435 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -6,507796 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.2.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 802,642146 \cdot 10^{-4} - 687,07485 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 115,567296 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.2.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 802,642146 \cdot 10^{-4} - 414,4261 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 388,216046 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.2.4.5}$$

### D.2.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -309,598544 \cdot 10^{-4} - 200,692594 \cdot 10^{-4} - 6,507796 \cdot 10^{-4} + 115,567296 \cdot 10^{-4} + 388,216046 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta \eta_i = 0 \quad \text{D.2.5.1}$$

## D.2.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = (-309,598544 \cdot 10^{-4})^2 + (-200,692594 \cdot 10^{-4})^2 + (-6,507796 \cdot 10^{-4})^2 + (115,567296 \cdot 10^{-4})^2 + (388,216046 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 95851,25845 \cdot 10^{-8} + 40277,51729 \cdot 10^{-8} + 42,35140878 \cdot 10^{-8} + 13355,7999 \cdot 10^{-8} + 150711,6984 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 300238,6254 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.2.6.1}$$

## D.2.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta \eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \eta_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = \sqrt{\frac{300238,6254 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{300238,6254}{20}}$$

$$\delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{15011,93127} \Rightarrow \delta \eta = 122,5231867 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.2.7.1}$$

## D.2.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r \eta = \frac{\delta r \eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r \eta = \frac{122,5231867 \cdot 10^{-4}}{802,642146 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r \eta = 0,152649824 \quad \text{D.2.8.1}$$

### D.2.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,152649829 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 15,26\% \quad \text{D.2.9.1}$$

### D.2.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 8,03\% - 8,03\% \cdot \frac{15,26}{100} \Rightarrow E_i = 8,03\% - 1,22\% \Rightarrow E_i = 6,8\%$$

$$E_s = 8,03\% + 1,22\% \Rightarrow E_s = 9,25\%$$

$$I_{\text{conf}} = [6,8 ; 9,25]\% \quad \text{D.2.10.1}$$

### D.3 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 3º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.3.1}$$

#### D.3.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de } 8\text{h a } 17\text{h} \Rightarrow \Delta T = 33,8 - 31,6 = 2,2\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.3.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de } 9\text{h a } 16\text{h} \Rightarrow \Delta T = 40,1 - 32,4 = 7,7\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.3.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de } 10\text{h a } 15\text{h} \Rightarrow \Delta T = 40,5 - 30,5 = 6,0\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.3.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de } 11\text{h a } 14\text{h} \Rightarrow \Delta T = 40,8 - 35,6 = 5,2\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.3.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de } 12\text{h a } 13\text{h} \Rightarrow \Delta T = 40,4 - 37,4 = 3,0\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.3.1.5}$$

### D.3.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(2,2\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 2,2 = 0,02399309 = 2,40\% \quad \text{D.3.2.1}$$

$$\eta(7,7\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,7 = 0,083975815 = 8,40\% \quad \text{D.3.2.2}$$

$$\eta(6,0\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 6,0 = 0,0654357 = 6,54\% \quad \text{D.3.2.3}$$

$$\eta(5,2\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,2 = 0,05671094 = 5,67\% \quad \text{D.3.2.4}$$

$$\eta(3,0\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 3,0 = 0,03271785 = 3,27\% \quad \text{D.3.2.5}$$

### D.3.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{239,9309 \cdot 10^{-4} + 839,75815 \cdot 10^{-4} + 654,357 \cdot 10^{-4} + 567,1094 \cdot 10^{-4} + 327,1785 \cdot 10^{-4}}{5}$$
$$\bar{\eta} = \frac{2628,34205 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 525,66841 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 5,26\% \quad \text{D.3.3.1}$$

### D.3.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 525,66891 \cdot 10^{-4} - 239,9309 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = 285,73801 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.3.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 525,66891 \cdot 10^{-4} - 839,75815 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -314,08924 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.3.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 525,66891 \cdot 10^{-4} - 654,357 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -128,65802 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.3.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 525,66891 \cdot 10^{-4} - 567,1094 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = -41,44049 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.3.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 525,66891 \cdot 10^{-4} - 327,1785 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 198,4904 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.3.4.5}$$

### D.3.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 285,73801 \cdot 10^{-4} - 314,08924 \cdot 10^{-4} - 128,68809 \cdot 10^{-4} - 41,44049 \cdot 10^{-4} + 198,4904 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.3.5.1}$$

### D.3.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (285,73801 \cdot 10^{-4})^2 + (-314,08924 \cdot 10^{-4})^2 + (-128,68809 \cdot 10^{-4})^2 + (-41,44049 \cdot 10^{-4})^2 + (198,4904 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 81646,21036 \cdot 10^{-8} + 98652,05068 \cdot 10^{-8} + 16560,62451 \cdot 10^{-8} + 1717,31421 \cdot 10^{-8} + 39398,43889 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 237974,6387 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.3.6.1}$$

### D.3.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\eta_i)^2}{N \cdot (N-1)}} \Rightarrow \delta\eta = \sqrt{\frac{237974,6387 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5-1)}} \Rightarrow \delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{237974,6387}{20}}$$

$$\delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{11898,73193} \Rightarrow \delta\eta = 109,0813088 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.3.7.1}$$

### D.3.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r\eta = \frac{\delta r\eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r\eta = \frac{109,0813088 \cdot 10^{-4}}{525,66841 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r\eta = 0,207509728 \quad \text{D.3.8.1}$$

### D.3.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,207509728 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 20,75\% \quad \text{D.3.9.1}$$

### D.3.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 5,26\% - 5,26\% \cdot \frac{20,75}{100} \Rightarrow E_i = 5,26\% - 1,09\% \Rightarrow E_i = 4,17\%$$

$$E_s = 5,26\% + 1,09\% \Rightarrow E_s = 6,35\%$$

$$I_{\text{conf}} = [4,17 ; 6,35]\% \quad \text{D.3.10.1}$$

## D.4 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 4º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.4.1}$$

### D.4.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de 8h a 17h} \Rightarrow \Delta T = 38,0 - 31,0 = 7,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.4.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de 9h a 16h} \Rightarrow \Delta T = 38,6 - 31,9 = 6,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.4.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de 10h a 15h} \Rightarrow \Delta T = 38,9 - 33,5 = 5,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.4.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de 11h a 14h} \Rightarrow \Delta T = 39,1 - 35,5 = 3,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.4.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de } 12\text{h a } 13\text{h} \Rightarrow \Delta T = 38,3 - 37,7 = 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.4.1.5}$$

#### D.4.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(7,0 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,0 = 0,07634165 = 7,63 \% \quad \text{D.4.2.1}$$

$$\eta(6,7 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 6,7 = 0,073069865 = 7,31 \% \quad \text{D.4.2.2}$$

$$\eta(5,4 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,4 = 0,05889213 = 5,89 \% \quad \text{D.4.2.3}$$

$$\eta(3,6 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 3,6 = 0,03926142 = 3,93 \% \quad \text{D.4.2.4}$$

$$\eta(0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 0,6 = 0,00654357 = 0,65 \% \quad \text{D.4.2.5}$$

#### D.4.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{763,4165 \cdot 10^{-4} + 730,69865 \cdot 10^{-4} + 588,9213 \cdot 10^{-4} + 392,6142 \cdot 10^{-4} + 65,4357 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{2541,08635 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 508,21727 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 5,08 \% \quad \text{D.4.3.1}$$

#### D.4.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 508,21727 \cdot 10^{-4} - 763,4165 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = -255,19923 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.4.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 508,21727 \cdot 10^{-4} - 730,69865 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -222,48138 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.4.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 508,21727 \cdot 10^{-4} - 588,9213 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -80,70403 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.4.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 508,21727 \cdot 10^{-4} - 392,6142 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 115,60307 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.4.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 508,21727 \cdot 10^{-4} - 65,4357 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 442,78157 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.4.4.5}$$

#### D.4.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -255,19923 \cdot 10^{-4} - 222,48138 \cdot 10^{-4} - 80,70403 \cdot 10^{-4} + 115,60307 \cdot 10^{-4} + 442,78157 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.4.5.1}$$

#### D.4.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-225,19923 \cdot 10^{-4})^2 + (-222,48138 \cdot 10^{-4})^2 + (-80,70403 \cdot 10^{-4})^2 + (115,60307 \cdot 10^{-4})^2 + (442,78157 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 65126,64699 \cdot 10^{-8} + 49497,96445 \cdot 10^{-8} + 6513,140458 \cdot 10^{-8} + 13364,06979 \cdot 10^{-8} + 196055,5187 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 330557,3404 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.4.6.1}$$

#### D.4.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\eta_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \Rightarrow \delta\eta = \sqrt{\frac{330557,3404 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{330557,3404}{20}}$$

$$\delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{16527,86702} \Rightarrow \delta\eta = 128,5607523 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.4.7.1}$$

#### D.4.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r\eta = \frac{\delta r\eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r\eta = \frac{128,5607523 \cdot 10^{-4}}{508,21727 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r\eta = 0,252964155 \quad \text{D.4.8.1}$$

#### D.4.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,252964155 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 25,30\% \quad \text{D.4.9.1}$$

#### D.4.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 5,08\% - 5,08\% \cdot \frac{25,30}{100} \Rightarrow E_i = 5,08\% - 1,28\% \Rightarrow E_i = 3,80\%$$

$$E_s = 5,08\% + 1,28\% \Rightarrow E_s = 6,36\%$$

$$I_{\text{conf}} = [3,80 ; 6,36]\% \quad \text{D.4.10.1}$$

#### D.5 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 5º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.5.1}$$

##### D.5.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de } 8\text{h a } 17\text{h} \Rightarrow \Delta T = 41,5 - 29,5 = 12,0\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.5.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de } 9\text{h a } 16\text{h} \Rightarrow \Delta T = 41,8 - 34,5 = 7,3\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.5.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de 10h a 15h} \Rightarrow \Delta T = 42,0 - 37,5 = 4,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.5.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de 11h a 14h} \Rightarrow \Delta T = 42,5 - 39,0 = 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.5.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de 12h a 13h} \Rightarrow \Delta T = 41,6 - 40,2 = 1,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.5.1.5}$$

### D.5.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(12,0 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 12,0 = 0,1308714 = 13,09 \% \quad \text{D.5.2.1}$$

$$\eta(7,3 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,3 = 0,079613435 = 7,96 \% \quad \text{D.5.2.2}$$

$$\eta(4,5 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 4,5 = 0,049076775 = 4,91 \% \quad \text{D.5.2.3}$$

$$\eta(3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 3,5 = 0,038170825 = 3,82 \% \quad \text{D.5.2.4}$$

$$\eta(1,4 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 1,4 = 0,01526833 = 1,53 \% \quad \text{D.5.2.5}$$

### D.5.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{1308,714 \cdot 10^{-4} + 796,13435 \cdot 10^{-4} + 490,76775 \cdot 10^{-4} + 381,70825 \cdot 10^{-4} + 152,6833 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{3130,00765 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 626,00153 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 6,26 \% \quad \text{D.5.3.1}$$

### D.5.4 Determinação dos desvios

$$\Delta \eta_1 = 626,00153 \cdot 10^{-4} - 1308,714 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_1 = -682,71247 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.5.4.1}$$

$$\Delta \eta_2 = 626,00153 \cdot 10^{-4} - 796,13435 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_2 = -170,13282 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.5.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 626,00153 \cdot 10^{-4} - 490,76775 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = 135,23378 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.5.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 626,00153 \cdot 10^{-4} - 381,70825 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 244,29328 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.5.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 626,00153 \cdot 10^{-4} - 152,6833 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 473,31823 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.5.4.5}$$

### D.5.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -682,71247 \cdot 10^{-4} - 170,13282 \cdot 10^{-4} + 135,23378 \cdot 10^{-4} + 244,29328 \cdot 10^{-4} + 473,31823 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.5.5.5}$$

### D.5.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-682,71247 \cdot 10^{-4})^2 + (-170,13282 \cdot 10^{-4})^2 + (135,23378 \cdot 10^{-4})^2 + (244,29328 \cdot 10^{-4})^2 + (473,31823 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 466096,3263 \cdot 10^{-8} + 28945,17644 \cdot 10^{-8} + 18288,17525 \cdot 10^{-8} + 59679,20665 \cdot 10^{-8} + 224030,1469 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 797039,0315 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.5.6.1}$$

### D.5.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\eta_i)^2}{N \cdot (N-1)}} \Rightarrow \delta\eta = \sqrt{\frac{797039,0315 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5-1)}} \Rightarrow \delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{797039,0315}{20}}$$

$$\delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{39851,95158} \Rightarrow \delta\eta = 199,6295358 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.5.7.1}$$

#### D.5.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r\eta = \frac{\delta r\eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r\eta = \frac{199,6295358 \cdot 10^{-4}}{626,00153 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r\eta = 0,318896242 \quad \text{D.5.8.1}$$

#### D.5.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,318896242 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 31,89\% \quad \text{D.5.9.1}$$

#### D.5.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 6,26\% - 6,26\% \cdot \frac{31,89}{100} \Rightarrow E_i = 6,26\% - 2,00\% \Rightarrow E_i = 4,26\%$$

$$E_s = 6,26\% + 2,00\% \Rightarrow E_s = 8,26\%$$

$$I_{\text{conf}} = [4,26 ; 8,26]\% \quad \text{D.5.10.1}$$

#### D.6 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 6º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.6.1}$$

##### D.6.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de } 8\text{h a } 17\text{h} \Rightarrow \Delta T = 39,4 - 32,5 = 6,9\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.6.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de } 9\text{h a } 16\text{h} \Rightarrow \Delta T = 40,2 - 33,9 = 6,3\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{D.6.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de } 10\text{h a } 15\text{h} \Rightarrow \Delta T = 41,3 - 36,0 = 5,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.6.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de } 11\text{h a } 14\text{h} \Rightarrow \Delta T = 42,3 - 37,6 = 4,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.6.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de } 12\text{h a } 13\text{h} \Rightarrow \Delta T = 41,6 - 39,1 = 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.6.1.5}$$

### D.6.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(6,9 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 6,9 = 0,075251055 = 7,52 \% \quad \text{D.6.2.1}$$

$$\eta(6,3 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 6,3 = 0,068707485 = 6,88 \% \quad \text{D.6.2.2}$$

$$\eta(5,3 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,3 = 0,057801535 = 5,78 \% \quad \text{D.6.2.3}$$

$$\eta(4,7 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 4,7 = 0,051257965 = 5,12 \% \quad \text{D.6.2.4}$$

$$\eta(2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 2,5 = 0,027264875 = 2,73 \% \quad \text{D.6.2.5}$$

### D.6.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{752,51055 \cdot 10^{-4} + 687,07485 \cdot 10^{-4} + 578,01535 \cdot 10^{-4} + 512,57965 \cdot 10^{-4} + 272,64875 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{2802,82915 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 560,56583 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 5,60 \% \quad \text{D.6.3.1}$$

### D.6.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 560,56583 \cdot 10^{-4} - 752,51055 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = -191,94472 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.6.4.1.}$$

$$\Delta\eta_2 = 560,56583 \cdot 10^{-4} - 687,07485 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -126,50902 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.6.4.2.}$$

$$\Delta\eta_3 = 560,56583 \cdot 10^{-4} - 578,01535 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -17,44952 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.6.4.3.}$$

$$\Delta\eta_4 = 560,56583 \cdot 10^{-4} - 512,57965 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 47,98618 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.6.4.4.}$$

$$\Delta\eta_5 = 560,56583 \cdot 10^{-4} - 272,64875 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 287,91708 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.6.4.5.}$$

### D.6.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -191,94472 \cdot 10^{-4} - 126,50902 \cdot 10^{-4} - 17,44952 \cdot 10^{-4} + 47,98618 \cdot 10^{-4} + 287,91708 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.6.5.1}$$

### D.6.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-191,94472 \cdot 10^{-4})^2 + (-126,50902 \cdot 10^{-4})^2 + (-17,44952 \cdot 10^{-4})^2 + (47,98618 \cdot 10^{-4})^2 + (287,91708 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 36842,77554 \cdot 10^{-8} + 16004,53214 \cdot 10^{-8} + 304,4857482 \cdot 10^{-8} + 2302,673471 \cdot 10^{-8} + 82896,24496 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 138350,7118 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.6.6.1}$$

### D.6.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\eta_i)^2}{N \cdot (N-1)}} \Rightarrow \delta\eta = \sqrt{\frac{138350,7118 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5-1)}} \Rightarrow \delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{138350,7118}{20}}$$

$$\delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{6917,535591} \Rightarrow \delta\eta = 83,17172351 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.6.7.1}$$

#### D.6.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r\eta = \frac{\delta r\eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r\eta = \frac{83,17172351 \cdot 10^{-4}}{560,56383 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r\eta = 0,148371019 \quad \text{D.6.8.1}$$

#### D.6.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,148371019 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 14,84\% \quad \text{D.6.9.1}$$

#### D.6.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 5,60\% - 5,60\% \cdot \frac{14,84}{100} \Rightarrow E_i = 5,60\% - 0,83\% \Rightarrow E_i = 4,77\%$$

$$E_s = 5,60\% + 0,83\% \Rightarrow E_s = 6,43\%$$

$$I_{\text{conf}} = [4,77 ; 6,43]\% \quad \text{D.6.10.1}$$

#### D.7 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 7º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.7.1}$$

##### D.7.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T_{\text{de 8h a 17h}} \Rightarrow \Delta T = 39,6 - 31,1 = 8,5\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.7.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de 9h a 16h} \Rightarrow \Delta T = 40,2 - 32,5 = 7,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.7.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de 10h a 15h} \Rightarrow \Delta T = 41,1 - 33,9 = 7,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.7.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de 11h a 14h} \Rightarrow \Delta T = 43,6 - 37,2 = 4,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.7.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de 12h a 13h} \Rightarrow \Delta T = 40,4 - 39,7 = 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.7.1.5}$$

### **D.7.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura**

$$\eta(8,5 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 8,5 = 0,092700575 = 9,27 \% \quad \text{D.7.2.1}$$

$$\eta(7,7 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,7 = 0,083975815 = 8,40 \% \quad \text{D.7.2.2}$$

$$\eta(7,2 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,2 = 0,07852284 = 7,85 \% \quad \text{D.7.2.3}$$

$$\eta(4,4 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 4,4 = 0,04798618 = 4,80 \% \quad \text{D.7.2.4}$$

$$\eta(0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 0,7 = 0,007634165 = 0,76 \% \quad \text{D.7.2.5}$$

### **D.7.3 Determinação do rendimento médio**

$$\bar{\eta} = \frac{927,00575 \cdot 10^{-4} + 839,75815 \cdot 10^{-4} + 785,2284 \cdot 10^{-4} + 479,8618 \cdot 10^{-4} + 76,34165 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{3108,19575 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 621,63915 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 6,22 \% \quad \text{D.7.3.1}$$

### **D.7.4 Determinação dos desvios**

$$\Delta \eta_1 = 621,63915 \cdot 10^{-4} - 927,00575 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta \eta_1 = -305,3666 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.7.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 621,63915 \cdot 10^{-4} - 839,75815 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -218,119 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.7.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 621,63915 \cdot 10^{-4} - 785,2284 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -163,58925 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.7.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 621,63915 \cdot 10^{-4} - 479,8618 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 141,77735 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.7.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 621,63915 \cdot 10^{-4} - 76,34165 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 545,2975 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.7.4.5}$$

### D.7.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -305,3666 \cdot 10^{-4} - 218,119 \cdot 10^{-4} - 163,58925 \cdot 10^{-4} + 141,77735 \cdot 10^{-4} + 545,2975 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.7.5.1}$$

### D.7.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-305,3666 \cdot 10^{-4})^2 + (-218,119 \cdot 10^{-4})^2 + (-163,58925 \cdot 10^{-4})^2 + (141,77735 \cdot 10^{-4})^2 + (545,2975 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 93248,7604 \cdot 10^{-8} + 47575,89816 \cdot 10^{-8} + 26761,44272 \cdot 10^{-8} + 20100,01697 \cdot 10^{-8} + 297349,3635 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 485035,4818 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.7.6.1}$$

### D.7.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\eta_i)^2}{N \cdot (N-1)}} \Rightarrow \delta\eta = \sqrt{\frac{485035,4818 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5-1)}} \Rightarrow \delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{485035,4818}{20}}$$

$$\delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{24251,77409} \Rightarrow \delta\eta = 155,7298112 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.7.7.1}$$

#### **D.7.8 Determinação do desvio relativo**

$$\delta r\eta = \frac{\delta r\eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r\eta = \frac{155,7298112 \cdot 10^{-4}}{571,47178 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r\eta = 0,272506544 \quad \text{D.7.8.1}$$

#### **D.7.9 Determinação do desvio percentual**

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,272506544 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 27,25\% \quad \text{D.7.9.1}$$

#### **D.7.10 Determinação do intervalo de confiabilidade**

$$E_i = 6,22\% - 6,22\% \cdot \frac{27,25}{100} \Rightarrow E_i = 6,22\% - 1,69\% \Rightarrow E_i = 4,53\%$$

$$E_s = 6,22\% + 1,69\% \Rightarrow E_s = 7,95\%$$

$$I_{\text{conf}} = [4,53 ; 7,95]\% \quad \text{D.7.10.1}$$

#### **D.8 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 8º ensaio**

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.8.1}$$

### D.8.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de 8h a 17h} \Rightarrow \Delta T = 39,5 - 31,1 = 8,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.8.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de 9h a 16h} \Rightarrow \Delta T = 39,7 - 32,4 = 7,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.8.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de 10h a 15h} \Rightarrow \Delta T = 40,3 - 34,6 = 5,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.8.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de 11h a 14h} \Rightarrow \Delta T = 40,7 - 35,4 = 5,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.8.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de 12h a 13h} \Rightarrow \Delta T = 39,9 - 37,3 = 2,6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.8.1.5}$$

### D.8.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(8,4 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 8,4 = 0,09160998 = 9,16 \% \quad \text{D.8.2.1}$$

$$\eta(7,3 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,3 = 0,072613435 = 7,96 \% \quad \text{D.8.2.2}$$

$$\eta(5,7 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,7 = 0,062163915 = 6,22 \% \quad \text{D.8.2.3}$$

$$\eta(5,3 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,3 = 0,057801535 = 5,78 \% \quad \text{D.8.2.4}$$

$$\eta(2,6 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 2,6 = 0,02835547 = 2,83 \% \quad \text{D.8.2.5}$$

### D.8.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{916,0998 \cdot 10^{-4} + 726,13435 \cdot 10^{-4} + 621,63915 \cdot 10^{-4} + 578,01535 \cdot 10^{-4} + 283,5547 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{3195,44335 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 639,08867 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 6,39 \% \quad \text{D.8.3.1}$$

#### D.8.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 639,08867 \cdot 10^{-4} - 916,0998 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = -277,01113 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.8.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 639,08867 \cdot 10^{-4} - 796,13435 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -157,04568 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.8.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 639,08867 \cdot 10^{-4} - 621,63915 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = 17,44952 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.8.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 639,08867 \cdot 10^{-4} - 578,01535 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 61,07332 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.8.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 639,08867 \cdot 10^{-4} - 283,5547 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 355,53397 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.8.4.5}$$

#### D.8.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -277,01113 \cdot 10^{-4} - 157,04568 \cdot 10^{-4} + 17,44952 \cdot 10^{-4} + 61,07332 \cdot 10^{-4} + 355,53397 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.8.5.1}$$

#### D.8.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-277,01113 \cdot 10^{-4})^2 + (-157,04568 \cdot 10^{-4})^2 + (17,44952 \cdot 10^{-4})^2 + (61,07332 \cdot 10^{-4})^2 + (355,53397 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 62884,60964 \cdot 10^{-8} + 24663,34561 \cdot 10^{-8} + 304,4857482 \cdot 10^{-8} + 3729,950416 \cdot 10^{-8} + 126404,4038 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 217986,7952 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.8.6.1}$$

#### D.8.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\eta_i)^2}{N \cdot (N-1)}} \Rightarrow \delta\eta = \sqrt{\frac{217986,7952 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5-1)}} \Rightarrow \delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{217986,7952}{20}}$$

$$\delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{10899,33976} \Rightarrow \delta\eta = 104,3999031 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.8.7.1}$$

#### D.8.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r\eta = \frac{\delta r\eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r\eta = \frac{104,3999031 \cdot 10^{-4}}{639,08867 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r\eta = 0,163357461 \quad \text{D.8.8.1}$$

#### D.8.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,163357461 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 16,33\% \quad \text{D.8.9.1}$$

#### D.8.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 6,39\% - 6,39\% \cdot \frac{16,33}{100} \Rightarrow E_i = 6,39\% - 1,04\% \Rightarrow E_i = 5,35\%$$

$$E_s = 6,39\% + 1,04\% \Rightarrow E_s = 7,43\%$$

$$I_{\text{conf}} = [5,35 ; 7,43]\% \quad \text{D.8.10.1}$$

## **D.9 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 9º ensaio**

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.9.1}$$

### **D.9.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo**

$$\Delta T \text{ de 8h a 17h} \Rightarrow \Delta T = 39,5 - 31,1 = 8,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.9.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de 9h a 16h} \Rightarrow \Delta T = 40,1 - 32,6 = 7,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.9.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de 10h a 15h} \Rightarrow \Delta T = 40,6 - 35,2 = 5,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.9.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de 11h a 14h} \Rightarrow \Delta T = 41,4 - 37,5 = 3,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.9.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de 12h a 13h} \Rightarrow \Delta T = 40,3 - 39,3 = 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{D.9.1.5}$$

### **D.9.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura**

$$\eta(8,4 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 8,4 = 0,09160998 = 9,16 \% \quad \text{D.9.2.1}$$

$$\eta(7,5 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,5 = 0,081794625 = 8,18 \% \quad \text{D.9.2.2}$$

$$\eta(5,4 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,4 = 0,05889213 = 5,89 \% \quad \text{D.9.2.3}$$

$$\eta(3,9 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 3,9 = 0,042533205 = 4,25 \% \quad \text{D.9.2.4}$$

$$\eta(1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 1,0 = 0,01090595 = 1,09 \% \quad \text{D.9.2.5}$$

### D.9.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{0,09160998 \cdot 10^{-4} + 0,081794625 \cdot 10^{-4} + 0,05889213 \cdot 10^{-4} + 0,042533205 \cdot 10^{-4} + 0,01090595 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{0,28573589 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 0,057147178 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 5,71\% \quad \text{D.9.3.1}$$

### D.9.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 0,057147178 - 0,09160998 \Rightarrow \Delta\eta_1 = -0,034462802 \quad \text{D.9.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 0,057147178 - 0,081794625 \Rightarrow \Delta\eta_2 = -0,024647447 \quad \text{D.9.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 0,057147178 - 0,05889213 \Rightarrow \Delta\eta_3 = -0,001744953 \quad \text{D.9.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 0,057147178 - 0,042533205 \Rightarrow \Delta\eta_4 = 0,014613973 \quad \text{D.9.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 0,057147178 - 0,01090595 \Rightarrow \Delta\eta_5 = 0,0462541228 \quad \text{D.9.4.5}$$

### D.9.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -0,034462802 - 0,024647447 - 0,001744952 + 0,014613973 + 0,046241228$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.9.5.1}$$

### D.9.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-0,034462802)^2 + (-0,024647447)^2 + (-0,001744952)^2 + (0,014613973)^2 + (0,046241228)^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 0,001187084722 + 0,0006074966436 + 0,000003044857482 + 0,0002135682068 + 0,002138251167$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 0,004150043 \quad \text{D.9.6.1}$$

### D.9.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta \eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \eta_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = \sqrt{\frac{0,004150043 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{0,004150043}{20}}$$

$$\delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{2,0750215} \Rightarrow \delta \eta = 144,0493492 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.9.7.1}$$

### D.9.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r \eta = \frac{\delta r \eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r \eta = \frac{144,0493492 \cdot 10^{-4}}{571,47178 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r \eta = 0,252067284 \quad \text{D.9.8.1}$$

### D.9.9 Determinação do desvio percentual

$$\delta p \eta = \delta r \eta \cdot 100\%$$

$$\delta p \eta = 0,252067284 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p \eta \cong 25,21\% \quad \text{D.9.9.1}$$

#### D.9.10 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$E_i = 5,71\% - 5,71\% \cdot \frac{25,21}{100} \Rightarrow E_i = 5,71\% - 1,44\% \Rightarrow E_i = 4,27\%$$

$$E_s = 5,71\% + 1,44\% \Rightarrow E_s = 7,15\%$$

$$I_{\text{conf}} = [4,27 ; 7,15]\% \quad \text{D.9.10.1}$$

#### D.10 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 10º ensaio

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.10.1}$$

##### D.10.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo

$$\Delta T \text{ de 8h a 17h} \Rightarrow \Delta T = 37,1 - 31,0 = 6,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.10.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de 9h a 16h} \Rightarrow \Delta T = 38,4 - 32,3 = 6,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.10.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de 10h a 15h} \Rightarrow \Delta T = 39,2 - 33,8 = 5,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.10.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de 11h a 14h} \Rightarrow \Delta T = 40,0 - 36,1 = 3,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.10.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de 12h a 13h} \Rightarrow \Delta T = 39,0 - 38,1 = 0,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{D.10.1.5}$$

##### D.10.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(6,1 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,01090595 \cdot 6,1 = 0,066526295 = 6,65\% \quad \text{D.10.2.1}$$

$$\eta(6,1 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,01090595 \cdot 6,1 = 0,066526295 = 6,65\% \quad \text{D.10.2.2}$$

$$\eta(5,4^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,4 = 0,05889213 = 5,89\% \quad \text{D.10.2.3}$$

$$\eta(3,9^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 3,9 = 0,042533205 = 4,25\% \quad \text{D.10.2.4}$$

$$\eta(0,9^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 0,9 = 0,009813355 = 0,98\% \quad \text{D.10.2.5}$$

### D.10.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{665,26295 \cdot 10^{-4} + 665,26295 \cdot 10^{-4} + 588,9213 \cdot 10^{-4} + 425,33205 \cdot 10^{-4} + 98,15355 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{2442,9328 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 488,58656 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 4,88\% \quad \text{D.10.3.1}$$

### D.10.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 488,58656 \cdot 10^{-4} - 665,26295 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = -176,67639 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.10.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 488,58656 \cdot 10^{-4} - 665,26295 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -176,67639 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.10.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 488,58656 \cdot 10^{-4} - 588,9213 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -100,3348 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.10.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 488,58656 \cdot 10^{-4} - 425,33205 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 63,25445 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.10.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 488,58656 \cdot 10^{-4} - 98,15355 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 390,43295 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.10.4.5}$$

### D.10.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -176,67639 \cdot 10^{-4} - 176,67639 \cdot 10^{-4} - 100,3348 \cdot 10^{-4} + 63,25445 \cdot 10^{-4} + 390,43295 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta \eta_i = 0 \quad \text{D.10.5.1}$$

#### D.10.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = (-176,67639 \cdot 10^{-4})^2 + (-176,67639 \cdot 10^{-4})^2 + (-100,3348 \cdot 10^{-4})^2 + (63,25445 \cdot 10^{-4})^2 + (390,43295 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 31214,54678 \cdot 10^{-8} + 31214,54678 \cdot 10^{-8} + 10067,07209 \cdot 10^{-8} + 4001,125445 \cdot 10^{-8} + 152437,8884 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta \eta_i)^2 = 228935,1795 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.10.6.1}$$

#### D.10.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta \eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \eta_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = \sqrt{\frac{228935,1795 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{228935,1795}{20}}$$

$$\delta \eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{11446,75898} \Rightarrow \delta \eta = 106,9895274 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.10.7.1}$$

#### D.10.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r \eta = \frac{\delta r \eta}{\bar{\eta}}$$

$$\delta r \eta = \frac{106,9895274 \cdot 10^{-4}}{488,58656 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r \eta = 0,21897753 \quad \text{D.10.8.1}$$

#### **D.10.9 Determinação do desvio percentual**

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,21897763 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 21,90\% \quad \text{D.10.9.1}$$

#### **D.10.10 Determinação do intervalo de confiabilidade**

$$E_i = 4,88\% - 4,88\% \cdot \frac{21,90}{100} \Rightarrow E_i = 4,88\% - 1,06\% \Rightarrow E_i = 3,82\%$$

$$E_s = 4,88\% + 1,06\% \Rightarrow E_s = 5,99\%$$

$$I_{\text{conf}} = [3,82 ; 5,94]\% \quad \text{D.10.10.1}$$

#### **D.11 Determinação do intervalo de confiabilidade do rendimento referente ao 11º ensaio**

$$\eta(\Delta T) = 0,01090595 \cdot \Delta T \quad \text{D.11.1}$$

##### **D.11.1 Determinação da variação de temperatura para cada intervalo de tempo**

$$\Delta T \text{ de } 8\text{h a } 17\text{h} \Rightarrow \Delta T = 37,9 - 30,3 = 7,6^\circ\text{C} \quad \text{D.11.1.1}$$

$$\Delta T \text{ de } 9\text{h a } 16\text{h} \Rightarrow \Delta T = 38,5 - 32,6 = 5,9^\circ\text{C} \quad \text{D.11.1.2}$$

$$\Delta T \text{ de } 10\text{h a } 15\text{h} \Rightarrow \Delta T = 39,1 - 33,6 = 5,5^\circ\text{C} \quad \text{D.11.1.3}$$

$$\Delta T \text{ de } 11\text{h a } 14\text{h} \Rightarrow \Delta T = 39,8 - 35,7 = 4,1^\circ\text{C} \quad \text{D.11.1.4}$$

$$\Delta T \text{ de } 12\text{h a } 13\text{h} \Rightarrow \Delta T = 38,2 - 33,2 = 1,0^\circ\text{C} \quad \text{D.11.1.5}$$

### D.11.2 Determinação do rendimento para cada variação de temperatura

$$\eta(7,6^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 7,6 = 0,08288522 = 8,29\% \quad \text{D.11.2.1}$$

$$\eta(5,9^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,9 = 0,064345105 = 6,43\% \quad \text{D.11.2.2}$$

$$\eta(5,5^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 5,5 = 0,059982725 = 5,99\% \quad \text{D.11.2.3}$$

$$\eta(4,1^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 4,1 = 0,044714395 = 4,47\% \quad \text{D.11.2.4}$$

$$\eta(1,0^{\circ}\text{C}) = 0,01090595 \cdot 1,0 = 0,01090595 = 1,09\% \quad \text{D.11.2.5}$$

### D.11.3 Determinação do rendimento médio

$$\bar{\eta} = \frac{828,8522 \cdot 10^{-4} + 643,45105 \cdot 10^{-4} + 599,82725 \cdot 10^{-4} + 447,14395 \cdot 10^{-4} + 109,0595 \cdot 10^{-4}}{5}$$

$$\bar{\eta} = \frac{2628,33395 \cdot 10^{-4}}{5} \Rightarrow \bar{\eta} = 525,66679 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \bar{\eta} \cong 5,26\% \quad \text{D.11.3.1}$$

### D.11.4 Determinação dos desvios

$$\Delta\eta_1 = 525,66679 \cdot 10^{-4} - 828,8522 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_1 = -303,18541 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.11.4.1}$$

$$\Delta\eta_2 = 525,66679 \cdot 10^{-4} - 643,45105 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_2 = -117,78426 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.11.4.2}$$

$$\Delta\eta_3 = 525,66679 \cdot 10^{-4} - 599,82725 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_3 = -74,16046 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.11.4.3}$$

$$\Delta\eta_4 = 525,66679 \cdot 10^{-4} - 447,14395 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_4 = 78,52284 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.11.4.4}$$

$$\Delta\eta_5 = 525,66679 \cdot 10^{-4} - 109,0595 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \Delta\eta_5 = 416,57179 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.11.4.5}$$

### D.11.5 Determinação do somatório dos desvios

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = -303,18541 \cdot 10^{-4} - 117,78426 \cdot 10^{-4} - 74,16046 \cdot 10^{-4} + 78,52284 \cdot 10^{-4} + 416,57179 \cdot 10^{-4}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} \Delta\eta_i = 0 \quad \text{D.11.5.1}$$

### D.11.6 Determinação do somatório dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = (-303,18541 \cdot 10^{-4})^2 + (-117,78426 \cdot 10^{-4})^2 + (-74,16046 \cdot 10^{-4})^2 + (78,52284 \cdot 10^{-4})^2 + (416,57179 \cdot 10^{-4})^2$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 91921,39284 \cdot 10^{-8} + 13873,1319 \cdot 10^{-8} + 5499,773827 \cdot 10^{-8} + 6165,836402 \cdot 10^{-8} + 173532,0562 \cdot 10^{-8}$$

$$\sum_{i=1}^{N=5} (\Delta\eta_i)^2 = 290992,1912 \cdot 10^{-8} \quad \text{D.11.6.1}$$

### D.11.7 Determinação do desvio padrão

$$\delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\eta_i)^2}{N \cdot (N-1)}} \Rightarrow \delta\eta = \sqrt{\frac{290992,1912 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot (5-1)}} \Rightarrow \delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{290992,1912}{20}}$$

$$\delta\eta = 10^{-4} \cdot \sqrt{14549,60956} \Rightarrow \delta\eta = 120,6217624 \cdot 10^{-4} \quad \text{D.11.7.1}$$

### D.11.8 Determinação do desvio relativo

$$\delta r\eta = \frac{\delta r\eta}{\eta}$$

$$\delta r\eta = \frac{120,6217624 \cdot 10^{-4}}{525,66679 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \delta r\eta = 0,2294643 \quad \text{D.11.8.1}$$

#### **D.11.9 Determinação do desvio percentual**

$$\delta p\eta = \delta r\eta \cdot 100\%$$

$$\delta p\eta = 0,2294643 \cdot 100\% \Rightarrow \delta p\eta \cong 22,95\% \quad \text{D.11.9.1}$$

#### **D.11.10 Determinação do intervalo de confiabilidade**

$$E_i = 5,26\% - 5,26\% \cdot \frac{22,95}{100} \Rightarrow E_i = 5,26\% - 1,20\% \Rightarrow E_i = 4,06\%$$

$$E_s = 5,26\% + 1,20\% \Rightarrow E_s = 6,46\%$$

$$I_{\text{conf}} = [4,06 ; 6,46]\% \quad \text{D.11.10.1}$$

## APÊNDICE E

### E.1 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 1º ensaio

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 8,3^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 7,1^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 5,8^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.1}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 3,9^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 1,8^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.2}$$

#### E.1.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N} \quad \text{E.1.1.1}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{8,3 + 7,1 + 5,8 + 3,9 + 1,8}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{26,9}{5} \quad \text{E.1.1.2}$$

$$\Delta \bar{T} = 5,38^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.1.3}$$

#### E.1.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.1.2.1}$$

$$X_1 = 5,38 - 8,3 \Rightarrow X_1 = -2,92^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.2.2}$$

$$X_2 = 5,38 - 7,1 \Rightarrow X_2 = -1,72^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.2.3}$$

$$X_3 = 5,38 - 5,8 \Rightarrow X_3 = -0,42^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.2.4}$$

$$X_4 = 5,38 - 3,9 \Rightarrow X_4 = 1,48 ^\circ\text{C} \quad \text{E.1.2.5}$$

$$X_5 = 5,38 - 1,8 \Rightarrow X_5 = 3,58 ^\circ\text{C} \quad \text{E.1.2.6}$$

### E.1.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -2,92 - 1,72 - 0,42 + 1,48 + 3,58 = 0 \quad \text{E.1.3.1}$$

### E.1.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-2,92)^2 + (-1,72)^2 + (-0,42)^2 + (1,48)^2 + (3,58)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 26,4961 (^\circ\text{C})^2 \quad \text{E.1.4.1}$$

### E.1.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{26,4961}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{26,4961}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{1,324805}$$

$$\delta_x = 1,151001738 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.5.1}$$

#### **E.1.6 Determinação do desvio relativo**

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,151001738 \text{ }^{\circ}\text{C}}{5,38 \text{ }^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,246246282 \quad \text{E.1.6.1}$$

#### **E.1.7 Determinação do desvio percentual**

$$\delta_{px} = 0,246246282 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 24,62\% \quad \text{E.1.7.1}$$

#### **E.1.8 Determinação do intervalo de confiabilidade**

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T})$$

$$E_i = 5,38 \text{ }^{\circ}\text{C} - 5,38 \cdot \frac{24,62}{100} \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 5,38 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1,32 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 4,06 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$E_s = 5,38 \text{ }^{\circ}\text{C} + 1,32 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_d = 6,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [4,06 ; 6,7] \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.1.8.1}$$

## E.2 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 2º ensaio

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 10,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 9,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 7,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 6,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 3,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.1}$$

### E.2.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{10,2 + 9,2 + 7,3 + 6,3 + 3,8}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{36,8}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 7,36 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.1.1}$$

### E.2.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.2.2.1}$$

$$X_1 = 7,36 - 10,2 \Rightarrow X_1 = -2,84 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.2.2}$$

$$X_2 = 7,36 - 9,2 \Rightarrow X_2 = -1,84 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.2.3}$$

$$X_3 = 7,36 - 7,3 \Rightarrow X_3 = 0,06 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.2.4}$$

$$X_4 = 7,36 - 6,3 \Rightarrow X_4 = 1,06 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.2.5}$$

$$X_5 = 7,36 - 3,8 \Rightarrow X_5 = 3,56 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.2.6}$$

### E.2.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -2,84 - 1,84 + 0,06 + 1,06 + 3,56 = 0 \quad \text{E.2.3.1}$$

### E.2.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-2,84)^2 + (-1,84)^2 + (0,06)^2 + (1,06)^2 + (3,56)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 25,252 \left( ^{\circ}\text{C} \right)^2 \quad \text{E.2.4.1}$$

### E.2.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{25,252}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{25,252}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{1,2626}$$

$$\delta_x = 1,123654751 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.5.1}$$

### E.2.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,123654751^{\circ}\text{C}}{7,36^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,152670482 \quad \text{E.2.6.1}$$

### E.2.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,152670482 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 15,27\% \quad \text{E.2.7.1}$$

### E.2.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T})$$

$$E_i = 7,36^{\circ}\text{C} - 7,36 \cdot \frac{15,27}{100}^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 7,36^{\circ}\text{C} - 1,12^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 6,24^{\circ}\text{C}$$

$$E_s = 7,36^{\circ}\text{C} + 1,12^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_d = 8,48^{\circ}\text{C}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [6,24 ; 8,48]^{\circ}\text{C} \quad \text{E.2.8.1}$$

## E.3 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 3º ensaio

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 2,2^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 7,7^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 6,0^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 5,2^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 3,8^{\circ}\text{C} \quad \text{E.3.1}$$

### E.3.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{2,2 + 7,7 + 6,0 + 5,2 + 3,8}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{24,1}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 4,82^{\circ}\text{C} \quad \text{E.3.1.1}$$

### E.3.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i$$

$$X_1 = 4,82 - 2,2 \Rightarrow X_1 = 2,62^{\circ}\text{C}$$

$$X_2 = 4,82 - 9,7 \Rightarrow X_2 = -2,88^{\circ}\text{C}$$

$$X_3 = 4,82 - 6,0 \Rightarrow X_3 = -1,18^{\circ}\text{C}$$

$$X_4 = 4,82 - 5,2 \Rightarrow X_4 = -0,38^{\circ}\text{C}$$

$$X_5 = 4,82 - 3,0 \Rightarrow X_5 = 1,82^{\circ}\text{C} \quad \text{E.3.2.1}$$

### E.3.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = 2,62 - 2,88 - 1,18 - 0,38 + 1,82 = 0 \quad \text{E.3.3.1}$$

### E.3.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (2,62)^2 + (-2,88)^2 + (-1,18)^2 + (-0,38)^2 + (1,82)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 22,008 (\text{°C})^2 \quad \text{E.3.4.1}$$

### E.3.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{22,008}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{22,008}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{1,1004}$$

$$\delta_x = 1,048999523 \text{ °C} \quad \text{E.3.5.1}$$

### E.3.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,048999523 \text{ }^{\circ}\text{C}}{4,82 \text{ }^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,217634755 \quad \text{E.3.6.1}$$

### E.3.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,217634755 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 21,76\% \quad \text{E.3.7.1}$$

### E.3.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T})$$

$$E_i = 4,82 \text{ }^{\circ}\text{C} - 4,82 \cdot \frac{21,76}{100} \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 4,82 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1,05 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 3,77 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$E_s = 4,82 \text{ }^{\circ}\text{C} + 1,05 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_d = 5,87 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [3,77 ; 5,87] \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.3.8.1}$$

## E.4 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 4º ensaio

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 7,0^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 6,7^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 5,4^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 3,6^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 0,6^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.1}$$

#### E.4.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{7,0 + 6,7 + 5,4 + 3,6 + 0,6}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{23,3}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 4,66^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.1.1}$$

#### E.4.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.4.2.1}$$

$$X_1 = 4,66 - 7,0 \Rightarrow X_1 = -2,34^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.2.2}$$

$$X_2 = 4,66 - 6,7 \Rightarrow X_2 = -2,04^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.2.3}$$

$$X_3 = 4,66 - 5,4 \Rightarrow X_3 = -0,74^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.2.4}$$

$$X_4 = 4,66 - 3,6 \Rightarrow X_4 = 1,06^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.2.5}$$

$$X_5 = 4,66 - 0,6 \Rightarrow X_5 = 4,06^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.2.6}$$

#### E.4.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -2,34 - 2,04 - 0,74 + 1,06 + 4,06 = 0 \quad \text{E.4.3.1}$$

#### E.4.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-2,34)^2 + (-2,04)^2 + (-0,74)^2 + (1,06)^2 + (4,06)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 27,792 \left( ^\circ\text{C} \right)^2 \quad \text{E.4.4.1}$$

#### E.4.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{27,792}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{27,792}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{1,3896}$$

$$\delta_x = 1,178812962 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.4.5.1}$$

#### **E.4.6 Determinação do desvio relativo**

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,178812962 \text{ }^{\circ}\text{C}}{4,66 \text{ }^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,298197424 \quad \text{E.4.6.1}$$

#### **E.4.7 Determinação do desvio percentual**

$$\delta_{px} = 0,298197424 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 29,82\% \quad \text{E.4.7.1}$$

#### **E.4.8 Determinação do intervalo de confiabilidade**

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T})$$

$$E_i = 4,66 \text{ }^{\circ}\text{C} - 4,66 \cdot \frac{29,82}{100} \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 4,66 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1,39 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 3,27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$E_s = 4,66 \text{ }^{\circ}\text{C} + 1,39 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_d = 6,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [3,27 ; 6,05] \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.4.8.1}$$

#### **E.5 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 5º ensaio**

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 12^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 7,3^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 4,5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 3,5^{\circ}\text{C} \ ; \ \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 1,4^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.1}$$

### E.5.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{12 + 7,3 + 4,5 + 3,5 + 1,4}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{28,7}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 5,74^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.1.1}$$

### E.5.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.5.2.1}$$

$$X_1 = 5,74 - 12 \Rightarrow X_1 = -6,26^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.2.2}$$

$$X_2 = 5,74 - 7,3 \Rightarrow X_2 = -1,56^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.2.3}$$

$$X_3 = 5,74 - 4,5 \Rightarrow X_3 = 1,24^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.2.4}$$

$$X_4 = 5,74 - 3,5 \Rightarrow X_4 = 2,24^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.2.5}$$

$$X_5 = 5,74 - 1,4 \Rightarrow X_5 = 4,34^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.2.6}$$

### E.5.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -6,26 - 1,56 + 1,24 + 2,24 + 4,34 = 0 \quad \text{E.5.3.1}$$

### E.5.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-6,26)^2 + (-1,56)^2 + (1,24)^2 + (2,24)^2 + (4,34)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 67,012 \left( ^\circ\text{C} \right)^2 \quad \text{E.5.4.1}$$

### E.5.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{67,012}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{67,012}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{3,3506}$$

$$\delta_x = 1,830464422 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.5.5.1}$$

#### **E.5.6 Determinação do desvio relativo**

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,830464422 \text{ }^{\circ}\text{C}}{5,74 \text{ }^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,31889624 \quad \text{E.5.6.1}$$

#### **E.5.7 Determinação do desvio percentual**

$$\delta_{px} = 0,31889624 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 31,89\% \quad \text{E.5.7.1}$$

#### **E.5.8 Determinação do intervalo de confiabilidade**

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T})$$

$$E_i = 5,74 \text{ }^{\circ}\text{C} - 5,74 \cdot \frac{31,89}{100} \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 5,74 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1,83 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 3,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$E_s = 5,74 \text{ }^{\circ}\text{C} + 1,83 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_d = 7,57 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [3,91 ; 7,57] \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.5.8.1}$$

#### **E.6 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 6º ensaio**

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 6,9^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 6,3^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 5,3^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 4,7^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 2,5^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.1}$$

### E.6.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{6,9 + 6,3 + 5,3 + 4,7 + 2,5}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{25,6}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 5,12^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.1.1}$$

### E.6.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.6.2.1}$$

$$X_1 = 5,12 - 6,9 \Rightarrow X_1 = -1,78^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.2.2}$$

$$X_2 = 5,12 - 6,3 \Rightarrow X_2 = -1,18^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.2.3}$$

$$X_3 = 5,12 - 5,3 \Rightarrow X_3 = -0,18^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.2.4}$$

$$X_4 = 5,12 - 4,7 \Rightarrow X_4 = 0,42^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.2.5}$$

$$X_5 = 5,12 - 2,5 \Rightarrow X_5 = 2,62^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.2.6}$$

### E.6.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -1,78 - 1,18 - 0,18 + 0,42 + 2,62 = 0 \quad \text{E.6.3.1}$$

### E.6.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-1,78)^2 + (-1,18)^2 + (-0,18)^2 + (0,42)^2 + (2,62)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 11,634 \left( ^\circ\text{C} \right)^2 \quad \text{E.6.4.1}$$

### E.6.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{11,634}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{11,634}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{0,5817}$$

$$\delta_x = 0,762692598 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.6.5.1}$$

### E.6.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{0,762692598 \text{ }^{\circ}\text{C}}{5,12 \text{ }^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,148963398 \quad \text{E.6.6.1}$$

### E.6.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,148963398 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 14,90\% \quad \text{E.6.7.1}$$

### E.6.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T})$$

$$E_i = 5,12 \text{ }^{\circ}\text{C} - 5,12 \cdot \frac{14,90}{100} \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 5,12 \text{ }^{\circ}\text{C} - 0,76 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 4,36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [4,36 ; 5,88] \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.6.8.1}$$

## E.7 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 7º ensaio

Sabemos que:

$$\Delta T_{8\text{h a } 17\text{h}} = 8,5 \text{ }^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{9\text{h a } 16\text{h}} = 7,7 \text{ }^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{10\text{h a } 15\text{h}} = 7,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11\text{h a } 14\text{h}} = 4,4 \text{ }^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{12\text{h a } 13\text{h}} = 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.7.1}$$

### E.7.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta\bar{T} = \frac{8,5 + 7,7 + 7,2 + 4,4 + 0,7}{5} \Rightarrow \Delta\bar{T} = \frac{28,5}{5}$$

$$\Delta\bar{T} = 5,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.7.1.1}$$

### E.7.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta\bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.7.2.1}$$

$$X_1 = 5,7 - 8,5 \Rightarrow X_1 = -2,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.7.2.2}$$

$$X_2 = 5,7 - 7,7 \Rightarrow X_2 = -2,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.7.2.3}$$

$$X_3 = 5,7 - 7,2 \Rightarrow X_3 = -1,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.7.2.4}$$

$$X_4 = 5,7 - 4,4 \Rightarrow X_4 = 1,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.7.2.5}$$

$$X_5 = 5,7 - 0,7 \Rightarrow X_5 = 5,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.7.2.6}$$

### E.7.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -2,8 - 2 + 1,5 + 1,3 + 5 = 0 \quad \text{E.7.3.1}$$

#### E.7.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-2,8)^2 + (-2,0)^2 + (-1,5)^2 + (1,3)^2 + (5,0)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 40,78 \left( ^\circ\text{C} \right)^2 \quad \text{E.7.4.1}$$

#### E.7.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{40,78}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{40,78}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{2,039}$$

$$\delta_x = 1,427935573 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.7.5.1}$$

#### E.7.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta T}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,427935573 \text{ } ^\circ\text{C}}{5,7 \text{ } ^\circ\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,250515012 \quad \text{E.7.6.1}$$

### **E.7.7 Determinação do desvio percentual**

$$\delta_{px} = 0,250515012 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 25,05\% \quad \text{E.7.7.1}$$

### **E.7.8 Determinação do intervalo de confiabilidade**

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T}) \quad \text{E.7.8.1}$$

$$E_i = 5,7^\circ\text{C} - 5,7 \cdot \frac{25,05}{100}^\circ\text{C} \Rightarrow E_i = 5,7^\circ\text{C} - 1,43^\circ\text{C} \Rightarrow E_e = 4,27^\circ\text{C} \quad \text{E.7.8.2}$$

$$E_s = 5,7^\circ\text{C} + 1,43^\circ\text{C} \Rightarrow E_d = 7,13^\circ\text{C} \quad \text{E.7.8.3}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [4,27 ; 7,13]^\circ\text{C} \quad \text{E.7.8.4}$$

### **E.8 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 8º ensaio**

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 8,4^\circ\text{C} ; \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 7,3^\circ\text{C} ; \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 5,7^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 5,3^\circ\text{C} ; \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 2,6^\circ\text{C} \quad \text{E.8.1}$$

### E.8.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{8,4 + 7,3 + 5,7 + 5,3 + 2,6}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{29,3}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 5,86 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.8.1.1}$$

### E.8.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.8.2.1}$$

$$X_1 = 5,86 - 8,4 \Rightarrow X_1 = -2,54 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.8.2.2}$$

$$X_2 = 5,86 - 7,3 \Rightarrow X_2 = -1,44 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.8.2.3}$$

$$X_3 = 5,86 - 5,7 \Rightarrow X_3 = 0,16 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.8.2.4}$$

$$X_4 = 5,86 - 5,3 \Rightarrow X_4 = 0,56 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.8.2.5}$$

$$X_5 = 5,86 - 2,6 \Rightarrow X_5 = 3,26 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.8.2.6}$$

### E.8.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -2,54 - 1,44 - 0,16 + 0,56 + 3,26 = 0 \quad \text{E.8.3.1}$$

#### E.8.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-2,54)^2 + (-1,44)^2 + (-0,16)^2 + (0,56)^2 + (3,26)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 19,492 \left( ^\circ\text{C} \right)^2 \quad \text{E.8.4.1}$$

#### E.8.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{19,492}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{19,492}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{0,9746}$$

$$\delta_x = 0,987218314 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.8.5.1}$$

#### E.8.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta T}$$

$$\delta_{rx} = \frac{0,987218314 \text{ } ^\circ\text{C}}{5,86 \text{ } ^\circ\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,168467289 \quad \text{E.8.6.1}$$

### E.8.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,168467289 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 16,85\% \quad \text{E.8.7.1}$$

### E.8.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T}) \quad \text{E.8.8.1}$$

$$E_i = 5,86^\circ\text{C} - 5,86 \cdot \frac{16,85}{100}^\circ\text{C} \Rightarrow E_i = 5,7^\circ\text{C} - 0,98^\circ\text{C} \Rightarrow E_e = 4,88^\circ\text{C} \quad \text{E.8.8.2}$$

$$E_s = 5,86^\circ\text{C} + 0,98^\circ\text{C} \Rightarrow E_d = 6,84^\circ\text{C} \quad \text{E.8.8.3}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [4,88 ; 6,84]^\circ\text{C} \quad \text{E.8.8.4}$$

### E.9 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 9º ensaio

Sabemos que:

$$\Delta T_{8h \text{ a } 17h} = 8,4^\circ\text{C} ; \Delta T_{9h \text{ a } 16h} = 7,5^\circ\text{C} ; \Delta T_{10h \text{ a } 15h} = 5,4^\circ\text{C} \quad \text{E.9.1}$$

$$\Delta T_{11h \text{ a } 14h} = 3,9^\circ\text{C} ; \Delta T_{12h \text{ a } 13h} = 1,0^\circ\text{C} \quad \text{E.9.2}$$

#### E.9.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta\bar{T} = \frac{8,4 + 7,5 + 5,4 + 3,9 + 1,0}{5} \Rightarrow \Delta\bar{T} = \frac{26,2}{5}$$

$$\Delta\bar{T} = 5,24 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.1.1}$$

## E.9.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta\bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.9.2.1}$$

$$X_1 = 5,24 - 8,4 \Rightarrow X_1 = -3,16 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.2.2}$$

$$X_2 = 5,24 - 7,5 \Rightarrow X_2 = -2,26 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.2.3}$$

$$X_3 = 5,24 - 5,4 \Rightarrow X_3 = -0,16 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.2.4}$$

$$X_4 = 5,24 - 3,9 \Rightarrow X_4 = 1,34 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.2.5}$$

$$X_5 = 5,24 - 1,0 \Rightarrow X_5 = 4,24 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.2.6}$$

## E.9.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -3,16 - 2,26 - 0,16 + 1,34 + 4,24 = 0 \quad \text{E.9.3.1}$$

## E.9.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-3,16)^2 + (-2,26)^2 + (-0,16)^2 + (1,34)^2 + (4,24)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 34,892 \left( ^\circ\text{C} \right)^2 \quad \text{E.9.4.1}$$

### E.9.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \quad \text{E.9.5.1}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{34,892}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{34,892}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{1,7446} \quad \text{E.9.5.2}$$

$$\delta_x = 1,32083307 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.9.5.3}$$

### E.9.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \overline{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,32083307 \text{ } ^\circ\text{C}}{5,24 \text{ } ^\circ\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,252067379 \quad \text{E.9.6.1}$$

### E.9.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,252067379 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 25,21\% \quad \text{E.9.7.1}$$

### E.9.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = \left( \Delta \bar{T} \pm \delta_{p_x} \cdot \Delta \bar{T} \right) \quad \text{E.9.8.1}$$

$$E_i = 5,24 \text{ }^{\circ}\text{C} - 5,24 \cdot \frac{25,21}{100} \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 5,24 \text{ }^{\circ}\text{C} - 1,32 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 3,92 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.8.2}$$

$$E_s = 5,24 \text{ }^{\circ}\text{C} + 1,32 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_d = 6,57 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.8.3}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [3,92 ; 6,57] \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.9.8.4}$$

### E.10 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 10º ensaio

Sabemos que:

$$\Delta T_{8\text{h a } 17\text{h}} = 6,1 \text{ }^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{9\text{h a } 16\text{h}} = 6,1 \text{ }^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{10\text{h a } 15\text{h}} = 5,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11\text{h a } 14\text{h}} = 3,9 \text{ }^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{12\text{h a } 13\text{h}} = 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.1}$$

#### E.10.1 Determinação da variação da temperatura média

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{6,1 + 6,1 + 5,4 + 3,9 + 0,9}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{22,4}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 4,48^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.1.1}$$

### E.10.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.10.2.1}$$

$$X_1 = 4,48 - 6,1 \Rightarrow X_1 = -1,62^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.2.2}$$

$$X_2 = 4,48 - 6,1 \Rightarrow X_2 = -1,62^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.2.3}$$

$$X_3 = 4,48 - 5,4 \Rightarrow X_3 = -0,92^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.2.4}$$

$$X_4 = 4,48 - 3,9 \Rightarrow X_4 = 0,58^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.2.5}$$

$$X_5 = 4,48 - 0,9 \Rightarrow X_5 = 3,58^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.2.6}$$

### E.10.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -1,62 - 1,62 - 0,92 + 0,58 + 3,58 = 0 \quad \text{E.10.3.1}$$

### E.10.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-1,62)^2 + (-1,62)^2 + (-0,92)^2 + (0,58)^2 + (3,58)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 19,248(^{\circ}\text{C})^2 \quad \text{E.10.4.1}$$

#### E.10.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{19,248}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{19,248}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{0,9624}$$

$$\delta_x = 0,981019877^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.5.1}$$

#### E.10.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{0,981019877^{\circ}\text{C}}{4,48^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,218977651 \quad \text{E.10.6.1}$$

#### E.10.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,218977651 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 21,90\% \quad \text{E.10.7.1}$$

#### E.10.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T}) \quad \text{E.10.8.1}$$

$$E_i = 4,48^{\circ}\text{C} - 4,48 \cdot \frac{21,90}{100}^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_i = 4,48^{\circ}\text{C} - 0,98^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_e = 3,5^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.8.2}$$

$$E_s = 4,48^{\circ}\text{C} + 0,98^{\circ}\text{C} \Rightarrow E_d = 5,46^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.8.3}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [3,5 ; 5,46]^{\circ}\text{C} \quad \text{E.10.8.4}$$

### **E.11 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente ao 11º ensaio**

Sabemos que:

$$\Delta T_{8\text{h a } 17\text{h}} = 7,6^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{9\text{h a } 16\text{h}} = 5,9^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{10\text{h a } 15\text{h}} = 5,5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{11\text{h a } 14\text{h}} = 4,1^{\circ}\text{C} ; \Delta T_{12\text{h a } 13\text{h}} = 1,0^{\circ}\text{C} \quad \text{E.11.1}$$

#### **E.11.1 Determinação da variação da temperatura média**

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{7,6 + 5,9 + 5,5 + 4,1 + 1,0}{5} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{24,1}{5}$$

$$\Delta \bar{T} = 4,82^{\circ}\text{C} \quad \text{E.11.1.1}$$

### E.11.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.11.2.1}$$

$$X_1 = 4,82 - 7,6 \Rightarrow X_1 = -2,78 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.11.2.2}$$

$$X_2 = 4,82 - 5,9 \Rightarrow X_2 = -1,08 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.11.2.3}$$

$$X_3 = 4,82 - 5,5 \Rightarrow X_3 = -0,68 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.11.2.4}$$

$$X_4 = 4,82 - 4,1 \Rightarrow X_4 = 0,72 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.11.2.5}$$

$$X_5 = 4,82 - 1,0 \Rightarrow X_5 = 3,82 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{E.11.2.6}$$

### E.11.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -2,78 - 1,08 - 0,68 + 0,72 + 3,82 = 0 \quad \text{E.11.3.1}$$

### E.11.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-2,78)^2 + (-1,08)^2 + (-0,68)^2 + (0,72)^2 + (3,82)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 24,468 \left( ^{\circ}\text{C} \right)^2 \quad \text{E.11.4.1}$$

### E.11.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}} \quad \text{E.11.5.1}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{24,468}{5 \cdot (5 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{24,468}{20}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{1,2234} \quad \text{E.11.5.2}$$

$$\delta_x = 1,106074139 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.11.5.3}$$

### E.11.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta T}$$

$$\delta_{rx} = \frac{1,106074139 \text{ } ^\circ\text{C}}{4,82 \text{ } ^\circ\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,229475962 \quad \text{E.11.6.1}$$

### E.11.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,229475962 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 22,95\% \quad \text{E.11.7.1}$$

### E.11.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T}) \quad \text{E.11.8.1}$$

$$E_i = 4,82 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,82 \cdot \frac{22,95}{100} \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow E_i = 4,82 \text{ } ^\circ\text{C} - 1,10 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow E_e = 3,72 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.11.8.2}$$

$$E_s = 4,82 \text{ } ^\circ\text{C} + 1,10 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow E_d = 5,92 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.11.8.3}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [3,72 ; 5,92] ^\circ\text{C} \quad \text{E.11.8.4}$$

## **E.12 Determinação do intervalo de confiabilidade da variação da temperatura média referente aos 11 ensaios**

Sabemos que:

$$\Delta T_{1^\circ \text{ensaio}} = 8,3 ^\circ\text{C} ; \Delta T_{2^\circ \text{ensaio}} = 10,2 ^\circ\text{C} ; \Delta T_{3^\circ \text{ensaio}} = 2,2 ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.1}$$

$$\Delta T_{4^\circ \text{ensaio}} = 7,0 ^\circ\text{C} ; \Delta T_{5^\circ \text{ensaio}} = 12,0 ^\circ\text{C} ; \Delta T_{6^\circ \text{ensaio}} = 6,9 ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2}$$

$$\Delta T_{7^\circ \text{ensaio}} = 8,5 ^\circ\text{C} ; \Delta T_{8^\circ \text{ensaio}} = 8,4 ^\circ\text{C} ; \Delta T_{9^\circ \text{ensaio}} = 8,4 ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.3}$$

$$\Delta T_{10^\circ \text{ensaio}} = 6,1 ^\circ\text{C} ; \Delta T_{11^\circ \text{ensaio}} = 7,6 ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.4}$$

### **E.12.1 Determinação da variação da temperatura média**

$$\Delta \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_i}{N} \quad \text{E.12.1.1}$$

$$\Delta \bar{T} = \frac{8,3 + 10,2 + 2,2 + 7,0 + 12,0 + 6,9 + 8,5 + 8,4 + 8,4 + 6,1 + 7,6}{11} \Rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{85,5}{11} \quad \text{E.12.1.2}$$

$$\Delta \bar{T} = 7,77 ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.1.3}$$

### E.12.2 Determinação dos desvios

$$X = \Delta \bar{T} - \Delta T_i \quad \text{E.12.2.1}$$

$$X_1 = 7,77 - 8,3 \Rightarrow X_1 = -0,53 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.2}$$

$$X_2 = 7,77 - 10,2 \Rightarrow X_2 = -2,43 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.3}$$

$$X_3 = 7,77 - 2,2 \Rightarrow X_3 = 5,57 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.4}$$

$$X_4 = 7,77 - 7,0 \Rightarrow X_4 = 0,77 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.5}$$

$$X_5 = 7,77 - 12,0 \Rightarrow X_5 = -4,23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.6}$$

$$X_6 = 7,77 - 6,9 \Rightarrow X_6 = 0,87 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.7}$$

$$X_7 = 7,77 - 8,5 \Rightarrow X_7 = -0,73 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.8}$$

$$X_8 = 7,77 - 8,4 \Rightarrow X_8 = -0,63 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.9}$$

$$X_9 = 7,77 - 8,4 \Rightarrow X_9 = -0,63 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.10}$$

$$X_{10} = 7,77 - 6,1 \Rightarrow X_{10} = 1,67 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.11}$$

$$X_{11} = 7,77 - 7,6 \Rightarrow X_{11} = 0,17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.2.12}$$

### E.12.3 Determinação da somatória dos desvios

$$\sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = -0,53 - 2,43 + 5,57 + 0,77 - 4,23 + 0,87 - 0,73 - 0,63 - 0,63 + 1,67 + 0,17 = 0 \quad \text{E.12.3.1}$$

#### E.12.4 Determinação da somatória dos desvios ao quadrado

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = (-0,53)^2 + (-2,43)^2 + (5,57)^2 + (0,77)^2 + (-4,23)^2 + (0,87)^2 + (-0,73)^2 + (-0,63)^2 + (-0,63)^2 + (1,67)^2 + (0,17)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (X_i)^2 = 60,5979 \left( ^\circ\text{C} \right)^2 \quad \text{E.12.4.1}$$

#### E.12.5 Determinação do desvio padrão

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{60,5979}{11 \cdot (11 - 1)}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{\frac{60,5979}{110}} \Rightarrow \delta_x = \sqrt{0,55089}$$

$$\delta_x = 0,742219644 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{E.12.5.1}$$

#### E.12.6 Determinação do desvio relativo

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_x}{\Delta \bar{T}}$$

$$\delta_{rx} = \frac{0,742219644 \text{ } ^\circ\text{C}}{7,77 \text{ } ^\circ\text{C}} \Rightarrow \delta_{rx} = 0,095490246 \quad \text{E.12.6.1}$$

### E.12.7 Determinação do desvio percentual

$$\delta_{px} = 0,095490246 \cdot 100\% \Rightarrow \delta_{px} \cong 9,55\% \quad \text{E.12.7.1}$$

### E.12.8 Determinação do intervalo de confiabilidade

$$\Delta T_{\text{conf}} = (\Delta \bar{T} \pm \delta_{px} \cdot \Delta \bar{T}) \quad \text{E.12.8.1}$$

$$E_i = 7,77 \text{ }^\circ\text{C} - 7,77 \cdot \frac{9,55}{100} \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow E_i = 7,77 \text{ }^\circ\text{C} - 0,74 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow E_e = 7,03 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{E.12.8.2}$$

$$E_s = 7,77 \text{ }^\circ\text{C} + 0,74 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow E_d = 8,51 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{E.12.8.3}$$

Então, o intervalo de confiabilidade é:

$$\Delta T_{\text{conf}} = [7,03 ; 8,51] \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{E.12.8.4}$$

## APÊNDICE F

F.1. Tabela de registro de valores de temperatura dos 05 pontos de medição, em cada zona e de acordo com horário estabelecido

| ZONA           | 8 HORAS        |                |                |                |                |                | 9 HORAS        |                |                |                |                |                | 10 HORAS       |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> |
| Z <sub>s</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>i</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| T <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |

| ZONA           | 11 HORAS       |                |                |                |                |                | 12 HORAS       |                |                |                |                |                | 13 HORAS       |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> |
| Z <sub>s</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>i</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| T <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |

| ZONA           | 14 HORAS       |                |                |                |                |                | 15 HORAS       |                |                |                |                |                | 16 HORAS       |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> |
| Z <sub>s</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>i</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| T <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |

| ZONA           | 14 HORAS       |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> | T <sub>M</sub> |
| Z <sub>s</sub> |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>i</sub> |                |                |                |                |                |                |
| Z <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |
| T <sub>a</sub> |                |                |                |                |                |                |

## **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

ANDERSON, C.G. **Limnology of a Shallow Saline Meromitic Lake, Limnology and Oceanography**. Editora Edgard Blücher, 6ª Edição, Vol.3, p.256 – 269, São Paulo, 1958.

BEZERRA, Arnaldo Moura. **Aplicações Técnicas da Energia Solar**. João Pessoa, Editora Universitária – UFPB, 1985.

BENNETT, Carol Osborn. **Fenômenos dos Transportes de Quantidade de Movimento, Calor e Massa**. Trad. de Eduardo Walter Leser; S.Paulo, 1978.

COLLE, S. ; PEREIRA, E.B. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil – 1º Versão para Irradiação Global Derivada de Satélite e Validade na Superfície**. LABSOLAR/INMET, 1998.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Process**. Wiley, New York, 1991.

EDWARDS, C.H. ; PENNEY, David E. **Equações Diferenciais Elementares Com Problemas de Contorno**. Vol. Único, 3º ed. Rio de Janeiro: PHB – Prentice-Hall do Brasil, 1995.

FELTRE, Ricardo; YOSHINAGA, Setsuo. **Físico-Química: Teoria e Exercícios**. São Paulo: Moderna, 1974.

FOLCHITTO, Sergio. **Seawater as Salt and Water Source for Solar Ponds**. Solar Energy, USA: Vol. 46, p.343 – 351, 1991.

Grupo de Estudo Sobre Piscina Solar, Manual, p. 29-31, PUC – Minas Gerais, 2001.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física 2**. Vol. 2, 4<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC – Livro Técnico e Científico, 1996.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Academic Press, New york, 1983.

ISMAIL, Kamal Abdel Radi. **Energia Solar**. Campinas – São Paulo: Editora do Autor, 2000.

JORGE, José Roberto Abbud. **Estudo da Viabilidade de Instalação de Piscinas Solares para Produção de Energia Elétrica**. (Dissertação de Mestrado). EPUP, 2001.

JÚNIOR, Ivo de Lourenço. **Estudo de um sistema de aquecimento de água híbrido gás-solar** (Tese de Mestrado), Porto Alegre, 2000.

KALECSINSKY, A.V. **Über Die Unharischen Warmen und Heissen Kochsalzseen Als Natuerlich Waermeaccumulatore**, Ann. Physic IV, 7, p.408 – 416, 1902.

LESHUK, J.P.; ZAWORSKI, R.J.; STYRIS, D.L.; HARLING, O.K. **Solar Pond Stability Experiments**. **Solar Energy**. Vol. 21, p.237 – 244, Great Britain, 1978.

LOPES, Joaquim Teixeira. **Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido**. (Tese de Mestrado). UNICAMP – São Pulo, 2004.

NIELSEN, C.E. **Solar Energy Nonconvective Salt Gradient Solar Ponds**. New York: Marcel Dekker, 1980.

NOGUEIRA, José Wilson Lage. **Construção e Estudo de Um Modelo de Piscina Solar**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1986.

PALZ, W. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. Hemus, São Paulo, 1981.

PEREZ, R. **A New Simplified Version of The Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces**. **Solar Energy**, Vol. 39, p.221 – 231, 1987.

REIS, Lineu Belino. **Geração de Energia Elétrica**. São Paulo: Tec-Art Editora, 1998.

SALVADORETTI, J.L. **Modelo Matemático para Análise do Desempenho Térmico de Coletores Solares Cilíndrico-Parabólicos**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre. Brasil, 1983.

TABOR, H. **Solar Ponds**. *Solar Energy*, Inglaterra, v. 27(3): 181-194, jun, 1981.

TABOR, H.; DORON, B. **The Beith HA'ARAVA 5 MW Solar Pond**. *Solar Energy*, USA: Vol. 45, p.247 – 253, 1990.

TIPLER, Paul A. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Vol. 4, 3<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC – Livro técnico e Científico, 1995.

UGOLINO, Jr. L. **Protótipo de Uma Piscina Solar de Gradiente Salino**. Dissertações de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1983.

WANG, Y. F.; AKBARZADEH, A. **A Parametric Study on Solar Ponds**. *Solar Energy*, Vol. 3, p.555 – 562, 1983.

WEINBERGER, H. **The Physics of Solar Ponds**. *Solar Energy*. Vol. 8, 1964.

WILLIEEN, Van. **Termodinâmica e Ciclos Termodinâmicos**. Vol. Único, 5<sup>o</sup> ed. São Paulo, Edgard Blücher, p. 259-266, 2001.