

## ENSAIOS DE COLETORES SOLARES

**Manfred Georg Kratzenberg** – manfred@labsolar.ufsc.br

**Sergio Colle** – colle@emc.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica

### 2.2 Equipamentos e sistemas de aquecimento de água

**Resumo:** *Ensaio de coletores solares são atualmente, na maioria das instituições, realizados em ambientes externos (outdoor). Tradicionalmente, estes ensaios são executados em regime permanente (Steady State Test conditions - SST, norma ISO 9806, 1993). Grande estabilidade no nível da radiação solar e de outros parâmetros do ambiente, como temperatura e ventos, são, conseqüentemente, necessários. Na busca das condições de tempo apropriadas, um ensaio pode demorar até três meses, o que deixa o coletor ocupando durante este tempo na bancada de ensaios. Desde 1997, a norma européia para ensaios de coletores solares EN12975, permite que dados, medidos com basicamente todas as condições de tempo, possam ser incluídos em um novo tipo de ensaio que é denominado ensaio quase dinâmico (Quasi Dynamic Test - QDT) de coletores solares. Com essa opção o ensaio pode ser concluído em apenas uma semana. Enquanto o modelo do ensaio SST utiliza dois e no máximo três coeficientes do coletor para realizar uma regressão linear múltipla, o ensaio QDT requerer seis a nove componentes para essa regressão. Através dos ensaios QDT e SST foi determinada a energia que um coletor solar converte durante o ensaio. A incerteza desta energia e o nível de confiança desta incerteza foram calculados. O nível de confiança foi confirmado com medições independentes dos ensaios, obtidos através de uma ampla série de medições. Foi elaborado um método de correção de incertezas do ensaio para obter níveis de confiança de 95%. As vantagens do novo ensaio normatizado (QDT) são discutidas.*

#### **Abstract:**

*Collector tests are accomplished actually in most of the test institutes under outdoor test conditions. Traditionally these tests are accomplished under steady state test conditions - SST, (standard ISO 9806). Hard limited test conditions are necessary for the execution of this collector test. High stability for the solar radiation and other ambient conditions, like ambient temperature and wind speed, are consequently necessary. Searching the adequate ambient conditions for the test execution a SST collector test can need until three month to be accomplished. During this time the collector that has to be tested occupies the outdoor test rig. Since 1997 the European standard EN12975 permits that data with basically all weather conditions are exploitable for a new kind of collector test, which is denominated quasi dynamic test – QDT. With this test option it is feasible to accomplish the collector performance test during the test period of almost one week. While the SST collector model is constituted with only two and maximal three collector sub-models and coefficients, that are used for a regression, the QDT model uses six to nine model components for the interpretation of the collector performance. In the present article the SST and QDT model coefficients are determined from the same collector by these outdoor collector tests. The produced energy during the collector tests, the measuring uncertainties of that amount of energy and the confidence level for that uncertainty is calculated for the test results. The calculated confidence level is compared to the real confidence level, which is determined with a series of test independent data. A unique method was elaborated to correct the uncertainty of the collector test results, to obtain 95% of confidence level for the test results. The advantages of the quasi dynamic collector test, compared to the steady state test are remarked and discussed.*

**Palavras-chave:** *Ensaio de coletores, modelos de coletores, Incertezas de regressão.*

## 1. Introdução

Resultados de ensaios de coletores, representados por *coeficientes do modelo do coletor*, são atualmente utilizados para a estimação da energia que coletores solares convertem quando forem utilizados em uma região específica. Regiões com diferentes características climáticas são especificadas com os dados de um ano típico meteorológico (*Typical Meteorological Year - TMY*) [11], que compreende as médias horárias da *radiação solar global* no plano horizontal e da *temperatura ambiente*. Estes dados são utilizados junto com o *modelo do coletor* e um *perfil de consumo* de água quente, para calcular a energia que um coletor converte durante um ano de uso na região geográfica do TMY. Atualmente, já é usual que os resultados destes cálculos acompanham os resultados dos ensaios de coletores para sistemas típicos de aquecimento solar com diferentes áreas de coletores [5, anexo 2]. Assim, é possível de projetar e comprar os coletores utilizados em sistemas de aquecimento solar incluindo o critério da energia que estes coletores produzirão. As normas determinam as incertezas de medição dos transdutores, mas não determinam os cálculos para obter as incertezas dos resultados dos ensaios. Neste artigo são apresentados os resultados baseados em três meses de ensaio contínuo utilizando o mesmo coletor.

## 2. Ensaio em regime permanente (*Steady State Test - SST*)

O modelo do SST (Eq. 1), é utilizado para a regressão e para apresentação dos resultados em forma de uma curva de eficiência padronizada é apresentado (Figura 1),

$$\frac{\overbrace{(T_{out} - T_{in}) \dot{m} c_p}^{\eta_{me}}}{A G} = \overbrace{\underbrace{\eta_0}_{\substack{\text{propriedades} \\ \text{ópticas}}} + \underbrace{\left( \frac{k_1}{a_2} \frac{\Delta T}{G} + \frac{k_2}{a_3} \frac{(\Delta T)^2}{G} \right)}_{\substack{\text{propriedades de perda de calor}}}}^{\eta_{mo}} \quad (1)$$

onde A é a área da cobertura transparente do coletor de ensaio, os coeficientes  $k_1$  [W/(m<sup>2</sup>K)] e  $k_2$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)] definem as *perdas térmicas* deste coletor e o coeficiente  $\eta_0$  [adimensional] é a *eficiência do coletor sem perdas térmicas*, que define a performance ótica deste coletor. Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $\eta_0$  são obtidos no ensaio em regime permanente (SST) através da medição das variáveis  $T_{in}$  e  $T_{out}$ , que são as temperaturas de entrada e de saída do coletor, da variável  $G$  [W/m<sup>2</sup>], que é a radiação solar global no plano inclinado do coletor e de  $\dot{m}$  [kg/s], que é a vazão mássica do coletor. O calor específico da água no coletor  $c_p$  [J/(kgK)] é calculado com um polinômio em função da temperatura medida  $T_m$  do coletor, que é a *média aritmética* de  $T_{in}$  e  $T_{out}$ . A temperatura  $\Delta T$  expressa a diferença ente  $T_m$  e da temperatura ambiente  $T_a$ , sendo  $T_m$  sempre maior que  $T_a$ . Multiplicando-se a eficiência medida  $\eta_{me}$  e a do modelo do coletor  $\eta_{mo}$  (Eq. 1) pela radiação  $G$  obtém-se na equação (2) a potência térmica medida  $\dot{Q}_{me}$  [W/m<sup>2</sup>] e a do modelo  $\dot{Q}_{mo}$  [W/m<sup>2</sup>] do coletor.

$$\frac{\overbrace{(T_{out} - T_{in}) \dot{m} c_p}^{\dot{Q}_{me}}}{A} = \overbrace{\underbrace{\eta_0 G}_{\substack{\text{propriedades} \\ \text{ópticas}}} + \underbrace{\left( \frac{k_1}{a_2} \frac{\Delta T}{G} + \frac{k_2}{a_3} \frac{(\Delta T)^2}{G} \right)}_{\substack{\text{propriedades de perda de calor}}}}^{\dot{Q}_{mo}} \quad (2)$$

## 3. Curva padronizada da eficiência do coletor

A curva padronizada da eficiência de coletores (Figura 1), que é normatizada pelas normas EN12975 [1], ISO 9806 [2] e NBR 10184 [3], é obtida com a equação (1). Esta, é utilizada para a demonstração do desempenho do coletor. Como a abscissa é definida por  $\Delta T/G$ , os efeitos da radiação e da temperatura não podem ser observados separadamente nesta curva.

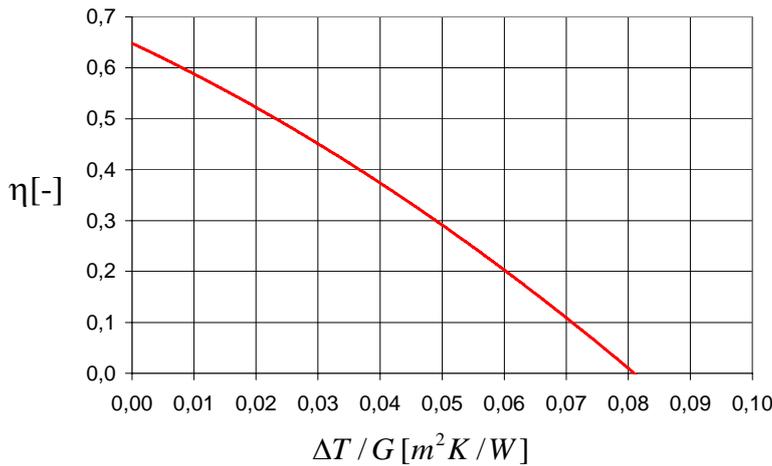


Figura 1 – Exemplo da curva padronizada com a eficiência do coletor  $\eta$  adimensional na sua ordenada em função de parâmetros de temperatura e de radiação do ensaio

#### 4. Modelo completo do coletor solar no ensaio quase dinâmico (*Quase Dynamic Test -QDT*)

O modelo completo do coletor (Eq. 3), consiste em vários submodelos com os quais o modelo em regime permanente (Eq. 2) é aperfeiçoado [1]. As perdas térmicas, definidas pelos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$ , são calculadas com o mesmo modelo do SST. Com os dois componentes da radiação global (a radiação direta  $G_b [W/m^2]$  e a difusa  $G_d [W/m^2]$ ) são levantados três diferentes submodelos, que expressam a potência térmica do coletor, desconsiderando perdas térmicas e efeitos dinâmicos: (i) um submodelo constitui a conversão através da radiação difusa  $G_d$ , (ii) um através da radiação direta  $G_b$ , (iii) e um constitui perdas decorrentes do aumento de efeitos de reflexão e da redução de efeitos de absorção da radiação  $G_b$  para maiores ângulos de incidência  $\theta [^\circ]$ , onde  $\theta$  é o ângulo entre a normal do coletor e o sol.  $K_{\theta b}$ [adimensional] corresponde ao fator de correção de  $\eta_{0-QDT}$  para a radiação difusa e  $K_{\theta b}(\theta)$ [adimensional] corresponde à correção para a radiação direta. O fator de sensibilidade  $b_0$ [adimensional] pondera a função  $(1/\cos(\theta)-1)$  individualmente para o coletor do ensaio. A parte dinâmica do coletor é modelada através da variação  $\Delta T_m$  da temperatura média  $T_m$  do coletor no intervalo de tempo  $\Delta t$  e é ponderado com o coeficiente da *capacitância térmica do coletor*  $k_3 [J/(m^2K)]$ , cujo expressa a *capacitância térmica do coletor* junto com a *capacitância térmica do fluido* que este inclui.

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\dot{Q}_{mo}}_{Y - \text{potência estimada}} = & \overbrace{\left[ \underbrace{\eta_{0-QDT} G_b}_{\text{rad. direta}} + \underbrace{\eta_{0-QDT} b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) G_b}_{\text{potência perdida através do aumento de } \tau\alpha \text{ para ângulos de } \theta \neq 0} + \underbrace{\eta_{0-QDT} K_{\theta d} G_d}_{\text{modelo para a radiação difusa}} \right]}^{\text{propriedades óticas}} \\
 & + \underbrace{\left[ k_1 \Delta T + k_2 \Delta T^2 \right]}_{\text{características de perda de calor}} + \underbrace{\left[ k_3 \frac{\Delta T_m}{\Delta t} \right]}_{\text{características da inércia térmica}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Segundo a norma EN12975, este modelo é restrito aos coletores com cobertura e isolamento térmico. A norma define para coletores abertos (que não tem cobertura e isolamento térmico) a inclusão de mais três submodelos para a realização do ensaio QDT, devido da maior sensibilidade destes coletores a ventos e a radiações de onda longa do céu.

## 5. Condições de contorno

As condições de contorno, aplicadas para a seleção das medições, que são utilizadas para a avaliação dos ensaios SST e QDT, correspondem amplamente às condições impostas pelas normas EN12975, ISO 9806 e NBR 10184. Estas são resumidas na Tabela 1. Para garantir que a área completa do coletor seja exposta à mesma radiação global, esta foi medida duas vezes, sendo uma medição realizada no lado superior do coletor  $G_{up}$  e outra no lado inferior  $G_{down}$ . A velocidade do ar  $v$ , que flui em cima da cobertura do coletor, e depende do vento do ambiente, é corrigida por um ventilador radial com velocidade variável. Através do ajuste a velocidade  $v$  é mantida para  $(3 \pm 1)$  m/s. Os valores de incerteza expandida de medição (I.M.), obtidas do *balanço de incerteza de medição* [5] são inferiores aos valores especificados pelas normas, que são colocados entre colchetes na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de contorno para os ensaios SST e QDT

| Condição                                          | SST                                                      | QDT                                                      |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Varição máxima de $T_a$                           | $(T_a \pm 1)$ K                                          | Não limitada                                             |
| V.m. radiação global $G$                          | $(G \pm 50)$ W/m <sup>2</sup>                            | Não limitada                                             |
| Faixa de validação $G$                            | $(700 < G < 1100)$ W/m <sup>2</sup>                      | $(300 < G < 1100)$ W/m <sup>2</sup>                      |
| Faixa de validação $v$                            | $v \leq (3 \pm 1)$ m/s                                   | $v \leq (3 \pm 1)$ m/s                                   |
| Fração difusa $F_D = G_d/G$                       | $F_D \leq 0,3$                                           | Não limitada                                             |
| Ângulo de incidência $\theta$                     | $0 \leq \theta \leq 30^\circ$                            | $0 \leq \theta \leq 60^\circ$                            |
| Ensaio com $T_m \cong T_a, \theta \cong \theta_n$ | $(T_m - T_a) \leq (\pm 3)$ K                             | $(T_m - T_a) \leq (\pm 3)$ K                             |
| Ensaio com $T_m \cong T_a, \theta \cong \theta_n$ | $\theta_n \leq \theta \leq 30^\circ$                     | $\theta_n \leq \theta \leq 30^\circ$                     |
| Diferença $G_{up}$ e $G_{down}$                   | $G_{up} = G_{down} \leq \pm 100$ W/m <sup>2</sup>        | $G_{up} = G_{down} \leq \pm 100$ W/m <sup>2</sup>        |
| Condição $(T_{out} - T_{in})$                     | $(T_{out} - T_{in}) \geq 1$ K                            | $(T_{out} - T_{in}) \geq 1$ K                            |
| Estabilidade de $T_{in}$                          | $T_{in} \leq (\pm 0,1)$ K                                | $T_{in} \leq (\pm 1)$ K                                  |
| Diferença entre $T_m$ e $T_a$                     | $T_m > T_a$                                              | $T_m > T_a$                                              |
| Intervalo de medição                              | $(6,0 \pm 0,1)$ s                                        | $(6,0 \pm 0,1)$ s                                        |
| Intervalo das médias $\Delta t$                   | 15 min                                                   | 6 min                                                    |
| Estabilidade em $\Delta t$                        | $(60 \pm 0,6)$ kg/(m <sup>2</sup> h)                     | $(60 \pm 0,6)$ kg/(m <sup>2</sup> h)                     |
| Estabilidade vazão $\dot{m}$                      | $(60 \pm 3)$ kg/(m <sup>2</sup> h)                       | $(60 \pm 3)$ kg/(m <sup>2</sup> h)                       |
| Ensaio com nuvens                                 | Não é previsto                                           | $\Delta T_m/\Delta t \geq \pm (0,005)$ K/s               |
| I.M. Temperaturas                                 | $\pm 0,102$ K; $[\pm 0,1$ K]                             | $\pm 0,102$ K; $[\pm 0,1$ K]                             |
| IM. Vazão volumétrica                             | $\pm 0,476$ l/h; $[\pm 0,6$ l/h]                         | $\pm 0,476$ l/h; $[\pm 0,6$ l/h]                         |
| I.M. para $G = 800$ W/m <sup>2</sup>              | $\pm 40$ W/m <sup>2</sup> ; $[\pm 50$ W/m <sup>2</sup> ] | $\pm 40$ W/m <sup>2</sup> ; $[\pm 50$ W/m <sup>2</sup> ] |
| I.M. para $G_d = 300$ W/m <sup>2</sup>            | $\pm 28$ W/m <sup>2</sup> ; $[\pm 50$ W/m <sup>2</sup> ] | $28,5$ W/m <sup>2</sup> ; $[\pm 50$ W/m <sup>2</sup> ]   |
| I.M. Anemômetro                                   | $[\pm 0,5$ m/s]                                          | $[\pm 0,5$ m/s]                                          |
| I. do ângulo $\theta$ calculada                   | $\leq (\pm 1)^\circ$                                     | $\leq (\pm 1)^\circ$                                     |

O ângulo  $\theta$  é calculado com as equações definidas em [4] para uma superfície inclinada que é orientada para o norte.

## 6 Regressão linear múltipla

Das deduções apresentadas em [5] e [6], sabe-se que o mínimo da *soma dos mínimos quadrados*  $SS_E$  em uma regressão linear múltipla (Eq. 4), também denominada como *variância do termo de perturbação* [7], é utilizada para obter os coeficientes de regressão. Substituindo as variáveis de medição pelas variáveis  $X_i$  de regressão e os coeficientes do coletor pelos coeficientes de regressão  $a_i$  (equações 2 e 3), o termo  $SS_E$  [ $W^2/m^4$ ] é representado para o SST e QDT pela equação (4).

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left( \dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left( \dot{Q}_{me,i} - \sum_{j=1}^k (X_{j,i} a_j) \right)^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

Onde  $\dot{Q}_{me,i}$  [ $W/m^2$ ] é a média instantânea da potência térmica medida (equações 2 e 3) e  $\dot{Q}_{mo,i}$  [ $W/m^2$ ] é a média instantânea da potência calculada utilizando o modelo do coletor. A amostra de dados obtidos de um ensaio completo é determinada por  $i = (1 \text{ a } n)$  valores médios das *variáveis medidas*, que são utilizados para a regressão. Sendo  $X_{j,i} = (X_{1,1} \text{ a } X_{k,n})$  as *variáveis de regressão* obtidas das *variáveis medidas* e  $a_j = (a_1 \text{ a } a_k)$  os coeficientes a serem determinados pela regressão.

### 6.1 Determinação das incertezas dos coeficientes

A incerteza expandida dos coeficientes  $U(a_j)$  [5, 8] é calculada através da variância destes  $var(a_j)$  com a equação (5). Para a estimação das incertezas dos coeficientes com um *nível de confiança* de  $(1-\alpha) 100\% = 95\%$ , deve-se utilizar um *coeficiente de student* de  $t_{\alpha/2, n-k}$  com *nível de significância* de  $\alpha/2$  e com  $\nu = (n - k)$  *graus de liberdade*. Onde  $j = (1 \text{ a } k)$  é o número dos coeficientes obtidos pela regressão.

$$U(a_j) = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(a_j)} = \pm t_{\alpha/2, n-k} u(a_j) \quad (5)$$

Das deduções no apêndice 1 de [5] sabe-se que as variâncias  $var(a_1)$  a  $var(a_k)$  dos *coeficientes de regressão*  $a_1$  a  $a_k$  podem ser determinadas pela equação (6)

$$s^2 \left[ [X^T][X] \right]^{-1} = E(\sigma^2) \left[ [X^T][X] \right]^{-1} = \begin{bmatrix} \text{var}(a_1) & \text{cov}(a_1, a_2) & \cdots & \text{cov}(a_1, a_k) \\ \text{cov}(a_2, a_1) & \text{var}(a_2) & \cdots & \text{cov}(a_2, a_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(a_k, a_1) & \text{cov}(a_k, a_2) & \cdots & \text{var}(a_k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde  $E(\sigma^2)$  [ $W^2/m^4$ ] é a *estimativa da variância residual da população*, que equivale à *variância experimental de uma regressão*  $s^2$  e é calculada com a equação (7) através de  $n$  médias instantâneas.

$$E(\sigma)^2 = s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2}{d_f} = \frac{\{\epsilon\}^T \{\epsilon\}}{n-k} = \frac{\overbrace{\{ \{Y\} - [X] \times \{a\} \}^T \{ \{Y\} - [X] \times \{a\} \}}^{\text{expressão matricial}}}{n-k} \quad (7)$$

Maiores graus de liberdade  $d_f$ , determinados por  $(n - k)$ , reduzem o valor de  $E(\sigma)$ , onde  $n$  representa o número dos *valores médios da medição* obtidos através do ensaio e  $k$  representa o número dos *coeficientes do modelo* que é utilizado para a regressão.

## 7. Resultados de regressão

Na Tabela 2 é possível verificar que os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  dos diferentes QDT que foram executados estão sendo obtidos com valores e intervalos diferentes dos do SST. Mas esta diferença não influencia a performance do modelo na sua estimação de energia, pois estatisticamente os dois modelos fornecem as mesmas energias estimadas [5], considerando as incertezas de regressão obtidas da avaliação dos ensaios.

Tabela 2: Tabela com os intervalos de incerteza dos coeficientes aplicados às mesmas para os diferentes ensaios

| coeficientes                                | coeficientes de SST |       | coeficientes de QDT 1 |       | coeficientes de QDT 2 |       | coeficientes de QDT 3 |       | coeficientes de QDT 4 |       |
|---------------------------------------------|---------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
|                                             | min.                | max.  | min.                  | max.  | min.                  | max.  | min.                  | max.  | min.                  | max.  |
| $\eta_0$ [-]                                | 0.63                | 0.64  | 0.65                  | 0.66  | 0.65                  | 0.66  | 0.65                  | 0.66  | 0.65                  | 0.67  |
| $k_1$ [ W / m <sup>2</sup> K ]              | -3.45               | -3.04 | -5.59                 | -4.88 | -6.13                 | -5.36 | -5.93                 | -5.45 | -5.90                 | -5.27 |
| $k_2$ [ W / m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ] | -0.08               | -0.07 | -0.05                 | -0.04 | -0.04                 | -0.03 | -0.04                 | -0.03 | -0.04                 | -0.03 |
| $b_0$ [-]                                   | -                   | -     | -0.18                 | -0.10 | -0.15                 | -0.09 | -0.14                 | -0.10 | -0.19                 | -0.10 |
| $K_{0d}$ [-]                                | -                   | -     | 0.94                  | 0.97  | 0.92                  | 0.95  | 0.93                  | 0.95  | 0.91                  | 0.95  |
| $k_3$ [ kJ / m <sup>2</sup> K ]             | -                   | -     | -13.3                 | -11.4 | -14.5                 | -13.0 | -13.9                 | -12.5 | -14.9                 | -13.4 |

### 7.1 Intervalo de confiança e intervalo de predição da resposta média

Segundo [9] o *intervalo de confiança da resposta média*  $CI(\dot{Q}_{mo,i})$  é calculado através da raiz da *variância da resposta média*  $\text{var}(\dot{Q}_{mo,i})$  (Eq. 8), que pode ser denominada também como *desvio padrão da resposta média*.

$$CI(\dot{Q}_{mo,i}) = U_r(\dot{Q}_{mo,i}) = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(\dot{Q}_{mo,i})} = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{E(\sigma^2) \{X_0\} [ [X]^T [X] ]^{-1} \{X_{0,i}\}^T} \quad (8)$$

A matriz  $[ [X]^T [X] ]^{-1}$  é calculada com a matriz  $[X]$ , que é determinada pelas variáveis  $X_{1,i}$  a  $X_{k,n}$  de uma amostra. O vetor horizontal  $\{X_{0,i}\}$  é o elemento  $i$  dos  $i = (1 \text{ a } n)$  elementos ou linhas da matriz das variáveis  $[X]$ . Substituindo-se os vetores  $\{X_{0,i}\}$  com novos valores, independentes do ensaio, pode-se determinar as incertezas de regressão das respostas médias  $U_r(\dot{Q}_{mo,i})$  para futuras aplicações do coletor.

### 7.2 Determinação do intervalo de predição com 95% de confiança

Para cada resposta média, pode-se determinar um intervalo de predição  $PI(\dot{Q}_{mo,i})$  (Eq. 9), no qual futuras respostas do modelo devem estar localizadas com a confiança  $(1-\alpha) 100\% = 95\%$ ,

$$PI(\dot{Q}_{mo,i}) = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(\dot{Q}_{mo,i} - \dot{Q}_{me,i})} = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\sigma^2 (1 + \{X_0\} [ [X]^T [X] ]^{-1} \{X_0\}^T)} \quad (9)$$

onde  $\dot{Q}_{me,i}$  podem ser novos valores das potências térmicas medidas, que são consideradas independentes da amostra dos valores com que foi realizada o ensaio e a regressão.

Segundo [5] e [9], para 95% dos valores medidos o intervalo de predição é caracterizado com a equação (10).

$$-PI(\dot{Q}_{mo,i}) > \dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i} > PI(\dot{Q}_{mo,i}) \quad (10)$$

Para o ensaio QDT4 são apresentadas na Figura 2 as diferenças entre as potências térmicas medidas e as estimadas pelo modelo  $\epsilon_i = (\dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i})$  (compare equação 4). Os Intervalos de Predição - PI e os Intervalos de Confiança - CI, nesta figura são definidos para os valores individuais com a Equação (10). A figura visualiza os resultados obtidos de um ensaio completo. Os valores médios e máximos destes intervalos, obtidos dos ensaios realizados, são comparadas na Tabela 3 e Tabela 4.

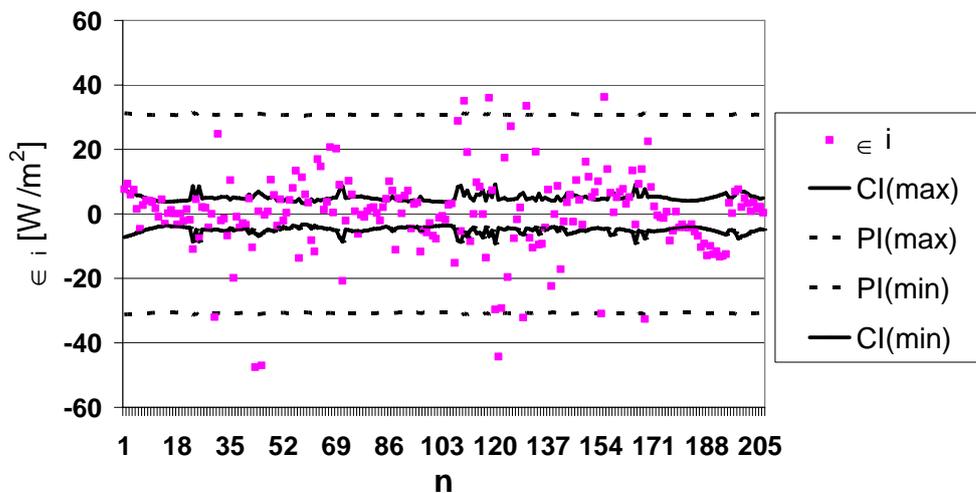


Figura 2 – Resíduos em um ensaio QDT (QDT nº4) - legenda: n é o número de medições,  $\epsilon_i$  é a diferença entre a potência térmica medida  $Q_{me}$  e a estimada pelo modelo  $Q_{mo}$ , PI(max) e PI(min) determinam o intervalo de predição e CI(min) e CI(max) determinam o intervalo de confiança

Na parte superior da Tabela 3, são apresentados os intervalos de predição dos ensaios QDT e do ensaio SST e os níveis de confiança reais, obtidos com 941 medições independentes do ensaio, onde  $t_{\alpha/2, n-k}$  são os fatores de Student e  $E(\sigma)$  são os estimados desvios padrão da população (Eq. 7). Os dois são obtidos através das regressões do ensaio SST e dos quatro ensaios QDT. Observa-se o baixo nível de confiança de 82,59 % no QDT3 e de 29% do SST, que são originados pela subestimação valor de  $E(\sigma)$  nestes ensaios. As 941 médias de 5 min foram selecionadas a partir de três meses de dados medidos, aplicando os critérios da Tabela 1. Podem-se substituir os valores estimados de  $\sigma$  (Eq. 7), utilizados para o cálculo do intervalo de confiança e de predição, com valores corrigidos de  $\sigma_c$  para que 95% dos 941 valores de  $\dot{Q}_{mo,i}$  cumpram a condição da equação (10). Os valores corrigidos de  $\sigma_c$  podem ser considerados como variância residual real.

Os resultados deste ajuste são apresentados na parte inferior da Tabela 3 e na Tabela 4. O valor de  $\sigma_c$  é calculado com a equação (11).

$$\sigma_c = F_{aj} E(\sigma) \quad (11)$$

Apesar de ter diferentes estimações de  $E(\sigma)$ , os valores de  $\sigma_c$  são bastante estáveis nos quatro ensaios QDT (Tabela 3). Destacam-se também a estabilidade dos intervalos de predição ajustados na

Tabela 3 para o QDT. O *intervalo de confiança real* foi também verificado para o SST. Pelas condições climáticas do ensaio SST, que são diferentes das condições das 941 medições, obtidos com critérios de seleção do QDT, observou-se o fator de 6 entre  $E(\sigma)$ , e  $\sigma_c$  (Tabela 3) para o SST. Uma razão para esta diferença é o fato que o modelo SST não é capaz de interpretar os efeitos dinâmicos do coletor.

Tabela 3: Intervalos de predição médios e máximos calculados ajustados

|                         | Intervalo de Predição          |       |       |       |       |                  |
|-------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------|
|                         | QDT1                           | QDT2  | QDT3  | QDT4  | SST   | unidades         |
| média                   | 30,08                          | 23,41 | 17,74 | 25,58 | 8,68  | W/m <sup>2</sup> |
| máximo                  | 30,94                          | 25,32 | 18,68 | 27,03 | 9,15  | W/m <sup>2</sup> |
| $t_{\alpha/2, n-k} (n)$ | 1,98                           | 1,98  | 1,98  | 1,98  | 2,16  | [ - ]            |
| $E(\sigma)$             | 13,56                          | 11,53 | 8,82  | 12,65 | 4,08  | W/m <sup>2</sup> |
| Cofiança                | 93,52                          | 89,59 | 82,47 | 90,75 | 29,00 | %                |
|                         | Intervalo de Predição ajustado |       |       |       |       |                  |
|                         | QDT1                           | QDT2  | QDT3  | QDT4  | SST   | unidades         |
| $\sigma_c$              | 15,59                          | 15,45 | 16,23 | 15,94 | 24,48 | W/m <sup>2</sup> |
| $F_{aj}$                | 1,15                           | 1,34  | 1,84  | 1,26  | 6,00  | [ - ]            |
| média                   | 34,59                          | 31,37 | 32,65 | 32,23 | 52,08 | W/m <sup>2</sup> |
| máximo                  | 35,58                          | 33,92 | 34,36 | 34,06 | 54,89 | W/m <sup>2</sup> |
| Cofiança                | 95,11                          | 95,06 | 95,20 | 95,15 | 95,22 | %                |

A Tabela 4 apresenta os intervalos de confiança, obtidos com os valores ajustados de  $\sigma_c$ , substituindo os valores de  $E(\sigma)$  na equação (8) com  $\sigma_c$ . Observa-se que o pior valor de 14,64 W/m<sup>2</sup> para o *intervalo de confiança máxima* de 941 intervalos calculados, é obtido com o menor valor de  $\sigma_c$  (QDT2, Tabela 4). O valor  $\sigma_c$  do ensaio SST é apenas 1,55 vezes maior que a média de  $\sigma_c$ , obtida dos ensaios QDT.

Tabela 4: Intervalos de confiança médios e máximos ajustados

|            | Intervalo de Confiança (Incertezas de regressão) |       |       |       |       |                  |
|------------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------|
|            | QDT1                                             | QDT2  | QDT3  | QDT4  | SST   | unidades         |
| $\sigma_c$ | 15,59                                            | 15,45 | 16,23 | 15,94 | 24,48 | W/m <sup>2</sup> |
| média      | 4,66                                             | 6,55  | 5,60  | 6,27  | 18,39 | W/m <sup>2</sup> |
| máximo     | 9,65                                             | 14,64 | 12,18 | 12,79 | 25,76 | W/m <sup>2</sup> |
| Cofiança   | 95,11                                            | 95,06 | 95,20 | 95,15 | 95,22 | %                |

## 8. Conclusões:

O novo ensaio QDT permite além da redução do custo e tempo de ensaio, um modelo mais completo do coletor que é habilitada para interpretar condições mais realistas. Como as condições do tempo no ensaio SST são bastante estáveis, observa-se baixas *incertezas de regressão estimadas* através da avaliação destes ensaios. Aplicando o modelo SST e sua incerteza para condições climáticas do QDT, que correspondem a condições mais realistas, observam-se baixos *níveis de confiança* para as incertezas estimadas (29%). As *incertezas reais* são obtidas com dados independentes dos ensaios, e observa-se que estas incertezas são maiores para o ensaio SST do que para ensaios QDT.

## 9. Referências:

- 1 CEN - Europäisches Komitee für Normung, DIN-CEN12975-1&2 *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile*, Entwurf: 1998; Teil 1 : *Allgemeine Anforderungen*; Teil 2 : *Prüfverfahren*, 1998.129p.
- 2 ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO9060 - *Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*, Genève Switzerland,1990.
- 3 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR 10184, *Coletores solares planos para líquido - Determinação do rendimento térmico*, ABNT, Brasil, 1988. 25p.
- 4 DUFFIE J.A. BECKMAN W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., 1991. 919 p.
- 5 KRATZENBERG (2005), *Método para avaliação de incertezas de ensaios de coletores solares baseados nas normas EN12975 e ISO9806*, Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Metrologia, Florianópolis, Brasil.
- 6 Hoffmann& Vieira (1987) *Análise de regressão - uma introdução à econometria*, 2ed. São Paulo Hucitec, 1987. p.251-256.
- 7 GUJARATI D. *Basic econometrics* Mc. Graw-Hill Higher education, 2003.
- 8 ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO-GUM, *Guia para a expressão da incerteza de medição*. 3 ed. brasileira: INMETRO, ABNT,SBM 120p. Edição revisada 2003. Original: *Guide to the expression of uncertainty in measurement* -1993.
- 9 MONTGOMERY D.C. AND RUNGER G.C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Chapters 10 and 12, Appendix A, Table II and Table IV, p.437, Arizona State University, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., 2003, 706 p.
- 10 INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, normalização e qualidade industrial, *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia* – Original: ISO-VIM *International vocabulary of basic and general terms in metrology* 2ª ed. Brasileira, Brasília, 2000.
- 11 MARION & URBAN K. *User's manual TMY2s- Typical Meteorological Year*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, U.S.A. 1995.