

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

**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**

Autor: Manfred Georg Kratzenberg

Orientador: Armando Albertazzi, Dr. Eng.

Co-orientadores: Saulo Güths, Dr. Eng.

Hans Georg Beyer, Dr. Rer. Nat.

Florianópolis, 07 de junho de 2005

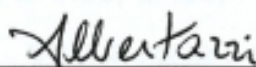
MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE ENSAIOS DE COLETORES SOLARES BASEADOS NAS NORMAS EN12975 E ISO9806

Manfred Georg Kratzenberg

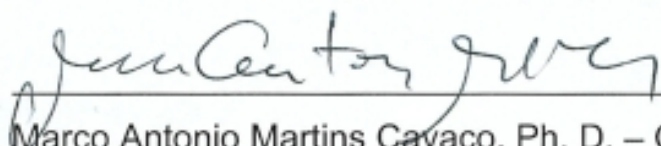
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

Mestre em Metrologia

e aprovada na sua forma final pelo
Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Indústria



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng. - Orientador

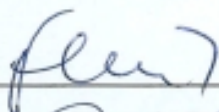


Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D. – Coordenador do Curso de
Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

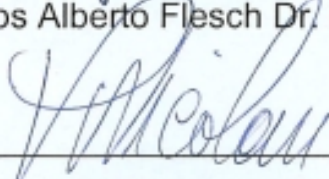
Banca Examinadora



Prof. Sergio Colle Dr. Eng.



Prof. Carlos Alberto Flesch Dr. Eng.



Prof. Vicente de Paulo Nicolau Dr. Eng.

À minha esposa, Tere, pelo amor,
pela paciência e por ter me acompanhado neste trabalho.

Aos meus pais,
Inge e Heinz Kratzenberg, e aos meus irmãos, Siegrid e Andréas,
pelo amor e apoio demonstrados, mesmo que à distância.

Ao Pietro, Enrico, Erica, Fernanda e Denílson,
pela alegria e o carinho
que sempre me deram.

“As ciências têm as raízes amargas, porém os frutos são muito doces.” Aristóteles

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Sergio Colle pela iniciativa de promover o projeto PROCEL/CELESC de suporte à presente pesquisa e pelo apoio dedicado ao meu trabalho no LABSOLAR.
- Ao programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica Industrial POS-MCI, seus coordenadores, corpo docente e coordenador da pós-graduação, pela maneira como me receberam e disponibilizaram sua infra-estrutura.
- Ao meu orientador Professor Armando Albertazzi pela indicação de caminhos novos e aperfeiçoamento das minhas formulações.
- Ao co-orientador Hans Georg Beyer pela confrontação em profundas discussões com a presente matéria.
- Ao co-orientador Saulo Güths pelo suporte técnico/científico e pela transferência das suas experiências em relação a assuntos particulares das pesquisas.
- Aos colegas do Laboratório de Energia Solar, LABSOLAR, pelo apoio em relação ao projeto e à infra-estrutura da bancada, assim como na facilitação da organização do material e, em especial, ao Samuel Luna de Abreu, Sylvio Luiz Mantelli, Julio Scussel, Thomaz Borges, Fernando Milanez, Claudionor Kosmann e Aldo Cosentino.
- Ao Daniel Fernandes Pedro Oikawa, Dirk Petzoldt e Rodrigo Machado pela ajuda na execução das obras do projeto e nos cálculos, sempre com eficiência surpreendente.
- Aos amigos do LABMETRO da POS-MCI e do LABSOLAR pela convivência, pela troca de idéias, experiências e pelo alegre convívio nas horas de pesquisa.
- À Rosana, Rosangela e Lina pelo profissionalismo e a atenção onipresente.
- Ao Cacá, que me ajudou a ver as coisas como elas realmente são.
- A Ni, ao Senhor Fernando, a Madrinha Mary e ao padrinho Enio pela amizade sempre presente.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
SUMÁRIO	5
RESUMO	14
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	16
LISTA DE ABREVIATURAS	19
SIMBOLOGIA	20
1 INTRODUÇÃO	20
2 COLETORES SOLARES	30
2.1 Modelo simplificado do coletor solar	30
2.1.1 <i>Potência térmica do coletor</i>	30
2.1.2 <i>Eficiência de η_0 do coletor</i>	31
2.1.3 <i>Coeficiente de perda térmica do coletor</i>	31
2.1.4 <i>Aproximação dos efeitos complexos de perdas térmicas do coletor</i>	32
2.1.5 <i>Visualização gráfica das características térmicas do coletor solar</i>	33
2.1.6 <i>Curva padronizada da eficiência do coletor</i>	34
2.2 Modelo completo do coletor solar	35
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3.1 Aplicações dos coletores solares	37
3.1.1 <i>Sistemas de aquecimento com circulação forçada</i>	37
3.1.2 <i>Sistemas de aquecimento com circulação natural</i>	37
3.2 Necessidade de ensaio de coletores	37
3.3 Métodos para medir a eficiência de sistemas de aquecimento solar	38
3.4 Referências para ensaios de coletores	39
3.4.1 <i>Ensaio de coletores em regime permanente</i>	39

3.4.2	<i>Ensaio em regime quase dinâmico</i>	40
3.4.3	<i>Regressão multilinear e incertezas nesta regressão</i>	42
3.5	Condições de contorno normatizadas para os ensaios <i>outdoor</i> do tipo SST e QDT	43
3.5.1	<i>Considerações sobre o coletor</i>	43
3.5.2	<i>Instalação da bancada e do coletor</i>	43
3.5.3	<i>Instalação dos transdutores</i>	45
3.5.4	<i>Sistema de medição</i>	46
3.5.5	<i>Incertezas e resolução</i>	46
3.5.6	<i>Operação da bancada</i>	47
3.5.7	<i>Ajuste de pontos de operação</i>	47
3.5.8	<i>Determinação das faixas de operação das grandezas medidas do ambiente</i>	48
3.5.9	<i>Método de regressão</i>	48
3.6	Ensaio em regime permanente (SST) ISO9806	48
3.6.1	<i>Condições de contorno para a definição da condição de estabilidade no ensaio SST</i>	48
3.6.2	<i>Determinação das faixas de operação das grandezas medidas do ambiente</i>	49
3.7	Ensaio em regime quase dinâmico (QDT) EN12975	49
3.7.1	<i>Norma para o ensaio em regime quase-dinâmico (QDT) EN12975</i>	50
3.7.2	<i>Condições especiais para o regime quase dinâmico</i>	50
3.7.3	<i>Determinação das faixas de operação das grandezas medidas do ambiente</i>	51
3.7.4	<i>Diagramas para o certificado do ensaio QDT</i>	51
3.7.5	<i>Componente do modelo quase dinâmico que determina o calor específico do coletor levando em conta o volume de água que ele contém</i>	53
3.7.6	<i>Modelo da radiação refletida de obstáculos na frente do coletor</i>	54
3.7.7	<i>Influência do vento e da radiação de onda longa (infravermelho) do céu no coletor</i>	54
3.7.8	<i>Considerações finais na aplicação dos resultados do ensaio QDT</i>	56
3.8	Métodos de avaliação dos ensaios	57
3.8.1	<i>Métodos para calcular incertezas em ensaios de regime permanente com o método ponderado de regressão</i>	57
3.8.2	<i>Métodos para a predição da produção anual de um coletor solar</i>	58
3.8.3	<i>Métodos de estimação da incerteza da produção anual</i>	58
3.8.4	<i>Métodos de classificação de coletores</i>	58
3.8.5	<i>Comparação dos resultados e das incertezas do ensaio em regime permanente com os do ensaio em regime quase dinâmico</i>	59
3.8.6	<i>Validação dos resultados do ensaio em regime quase dinâmico</i>	59
3.8.7	<i>Validação por estabilidade estatística dos resultados dos ensaios</i>	59
3.8.8	<i>Métodos de validação dos resultados de uma regressão multilinear</i>	60

4	CONFIGURAÇÃO DA BANCADA PARA OS ENSAIOS DE COLETORES	61
4.1	Estrutura mecânica	61
4.2	Sistema e circuito hidráulico	62
4.2.1	<i>Pressão da água no circuito hidráulico</i>	66
5	UNIDADE DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADA E TRANSDUTORES	ERRO!
	INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
5.1	Especificação da unidade de medição	67
5.2	Ligação e medição com as termorresistências	68
5.3	Medição das tensões	69
5.4	Medição das frequências	69
5.5	Unidade de multiplexação	69
5.6	Computador	70
5.7	Controle remoto do sistema	70
5.8	Software de medição	70
5.8.1	<i>Cálculo para determinar o ângulo entre o sol e o coletor</i>	71
5.9	Transdutores	74
5.9.1	<i>Transdutores para medição da radiação</i>	74
5.9.2	<i>Transdutores para medição da radiação difusa e global</i>	76
5.9.3	<i>Transdutor para medição da radiação difusa</i>	76
5.9.4	<i>Correção do erro de medição da radiação difusa</i>	77
5.9.5	<i>Transdutor para medição da vazão</i>	78
5.9.6	<i>Transdutor para medição das temperaturas no fluido</i>	79
5.9.7	<i>Transdutor para medição da temperatura ambiente</i>	80
5.9.8	<i>Transdutor para medição do fluxo de ar (anemômetro)</i>	80
5.10	Calibração dos transdutores	80
5.10.1	<i>Transdutores para medir o fluxo de ar sobre o coletor / anemômetro</i>	80
5.10.2	<i>Transdutores de temperatura</i>	82
5.10.3	<i>Transdutores para medir a radiação solar</i>	84
5.10.4	<i>Transdutor para medição da vazão</i>	85
5.10.5	<i>Unidade de medição e multiplexação (datalogger)</i>	85
5.10.6	<i>Padrão utilizado para a calibração</i>	85

5.11	Balanco de incertezas de medição dos transdutores, utilização e considerações sobre estas incertezas	86
5.11.1	<i>Incertezas expandidas</i>	86
5.11.2	<i>Incertezas aleatórias</i>	86
5.11.3	<i>Incertezas sistemáticas</i>	86
5.12	Condições de contorno dos ensaios	87
5.12.1	<i>Vazão adotada nos ensaios</i>	87
5.12.2	<i>Verificação da existência de turbulência na vazão ajustada</i>	87
5.12.3	<i>Exclusão de pontos de medição para pontos que não se localizam no I quadrante da curva de eficiência do coletor</i>	88
6	RESULTADOS	89
6.1	Ensaio de coletores	89
6.2	Seleção das amostras médias	91
6.2.1	<i>Fração difusa</i>	91
6.2.2	<i>Ângulo da radiação solar</i>	91
6.2.3	<i>Temperatura de entrada</i>	92
6.2.4	<i>Desvio temporal da vazão</i>	92
6.2.5	<i>Estabilidade da vazão</i>	92
6.2.6	<i>Medição para verificar o sombreamento do coletor</i>	92
6.2.7	<i>Pontos de medição no II quadrante</i>	93
6.2.8	<i>Pontos de medição no IV quadrante</i>	93
6.2.9	<i>Resumo dos critérios para seleção de dados utilizados para uma regressão de um ensaio do tipo SST</i>	93
6.2.10	<i>Resumo dos critérios para seleção de dados utilizados para uma regressão de um ensaio do tipo QDT</i>	94
6.3	Regressão linear múltipla ou regressão multilinear	95
6.3.1	<i>Determinação das incertezas dos coeficientes</i>	95
6.3.2	<i>Determinação das incertezas de regressão</i>	98
6.3.3	<i>Determinação do intervalo de predição com 95% de confiança</i>	99
6.4	Regressão linear múltipla ponderada	101
6.4.1	<i>Determinação das incertezas na regressão ponderada</i>	102
6.5	Comparação dos resultados dos ensaios em regime permanente (SST) com os do ensaio em regime quase dinâmico (QDT)	103

6.5.1	<i>Normalização do ensaio em regime quase dinâmico para comparação com os resultados do ensaio em regime permanente</i>	103
6.5.2	<i>Cálculo das incertezas de regressão das curvas padronizadas de eficiência dos ensaios QDT</i>	105
6.5.3	<i>Cálculo das incertezas de regressão das curvas padronizadas de eficiência do ensaio SST</i>	107
6.6	Método para obter o nível de confiança real em uma regressão	108
6.6.1	<i>Nível de confiança para um ensaio</i>	108
6.6.2	<i>Nível de confiança real de ensaios do tipo QDT</i>	109
6.7	Correção da incerteza para o intervalo de confiança de 95% para ensaios do tipo QDT	110
6.7.1	<i>Correção da incerteza com estatísticas elaboradas com ferramentas numéricas</i>	110
6.7.2	<i>Correção da incerteza baseada nas observações sobre a variância residual da população corrigida</i>	112
6.8	Exame da distribuição	113
6.8.1	<i>Exame gráfico</i>	113
6.8.2	<i>Exame matemático</i>	115
6.9	Exame dos resíduos	115
6.10	Método para verificar a estabilidade parcial do modelo dos ensaios em regime quase dinâmico	Erro!
	Indicador não definido.	
6.11	Método para verificar a estabilidade estatística do modelo dos ensaios de coletores	117
6.12	Teste para verificar se a produção da energia calculada através do modelo está correta	119
6.12.1	<i>Erro de ajuste para a energia que o modelo estima com as medições dos ensaios</i>	120
6.12.2	<i>Erro de ajuste para todos os dados selecionados</i>	120
6.13	Energia estimada pelo modelo QDT	120
6.14	Incertezas da energia estimada com o modelo QDT	121
6.14.1	<i>Cálculo das incertezas obtidas através de um modelo</i>	121
6.15	Incertezas aleatórias	121
6.15.1	<i>Cálculo para obter a incerteza da medição da potência térmica</i>	122
6.15.2	<i>Incerteza produzida através da regressão linear de um modelo não linear</i>	122
6.15.3	<i>Incerteza produzida através da correlação entre as variáveis de regressão</i>	123
6.16	Incertezas sistemáticas das potências estimadas pelo modelo QDT	123
6.16.1	<i>Medição das radiações e modelo do coletor</i>	123

6.16.2	<i>Incertezas produzidas através de incertezas sistemáticas não corrigíveis dos piranômetros</i>	124
6.16.3	<i>Incertezas produzidas através de incertezas sistemáticas dos piranômetros na medição da radiação direta</i>	124
6.16.4	<i>Incertezas sistemáticas dos piranômetros na medição da radiação difusa</i>	126
6.16.5	<i>Incertezas de correlação entre a radiação difusa e a radiação direta</i>	126
6.16.6	<i>Combinação das incertezas das radiações solares</i>	127
6.17	Incerteza expandida da energia estimada pelo modelo QDT	128
6.17.1	<i>Memorial para o balanço de incertezas da energia produzida para um ensaio do tipo QDT</i>	128
6.17.2	<i>Balanço de incertezas da energia produzida para um ensaio do tipo QDT</i>	129

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS **133**

7.1	Discussão sobre os resultados dos ensaios QDT	133
7.1.1	<i>Semelhanças entre os coeficientes de vários ensaios QDT</i>	133
7.1.2	<i>Diferença entre as curvas padronizadas de eficiência, obtidas por diferentes QDT</i>	134
7.1.3	<i>Intervalos de incertezas das curvas padronizadas</i>	134
7.1.4	<i>Comparação dos resultados do QDT de diferentes laboratórios</i>	134
7.1.5	<i>Incertezas dos coeficientes de regressão no QDT</i>	135
7.1.6	<i>Capacitância térmica obtida do QDT</i>	135
7.1.7	<i>Exame dos resíduos dos diferentes QDT</i>	135
7.1.8	<i>Teste de distribuição e nível de confiança</i>	136
7.1.9	<i>Nível de confiança observado no cálculo de incertezas</i>	136
7.1.10	<i>Incerteza da energia estimada com os ensaios QDT</i>	138
7.1.11	<i>Efeitos de correlação entre os coeficientes</i>	138
7.1.12	<i>Possibilidade de reduzir as incertezas do QDT</i>	139
7.1.13	<i>Incertezas sistemáticas originadas pelos piranômetros</i>	140
7.1.14	<i>Cálculo da incerteza da energia anual para o QDT</i>	140
7.2	Discussão sobre os resultados dos ensaios SST	141
7.2.1	<i>Semelhanças entre os coeficientes de vários ensaios SST</i>	141
7.2.2	<i>Intervalos da resposta média</i>	142
7.2.3	<i>Energia estimada com o SST</i>	142
7.3	Discussão sobre as diferenças entre ensaios QDT e SST	143
7.3.1	<i>Consideração genérica sobre os diferentes ensaios</i>	143
7.3.2	<i>Diferença nos coeficientes de regressão</i>	143

7.3.3	<i>Diferenças nos coeficientes η_{0-SST} e $\eta_{0-QDT(SST)}$</i>	143
7.3.4	<i>Diferenças nos coeficientes k_1 e k_2</i>	143
7.3.5	<i>Diferença nas energias estimadas com o SST e o QDT</i>	144
7.3.6	<i>Diferença nas energias estimadas com os coeficientes k_1 e k_2</i>	144
7.3.7	<i>Diferenças nas incertezas dos coeficientes de regressão</i>	145
7.3.8	<i>Diferenças nas curvas padronizadas de eficiência do SST com as curvas do QDT normalizadas para condições do SST</i>	145
7.4	Conclusões obtidas através dos ensaios e dos métodos aplicados	146
7.5	Conclusões em relação às normas EN12975 e ISO9806	148
7.6	Contribuições deste trabalho	149
7.7	Padrões TMY utilizados para a estimação da conversão anual de energia	150
7.8	Aspectos positivos	150
7.9	Aspectos negativos	151
7.10	Viabilidade da inclusão do balanço de incertezas nos certificados de ensaio de coletores solares	151
7.11	Trabalhos futuros	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
	APÊNDICES:	160
	APÊNDICE 1: REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA E DEDUÇÃO DAS INCERTEZAS OBTIDAS PELA REGRESSÃO	160
1.	<i>Introdução</i>	160
2.	<i>Problemas que podem modificar o resultado em uma regressão linear</i>	160
3.	<i>Estimação dos coeficientes em uma regressão linear múltipla / modelo de regressão para amostras infinitas</i>	161
4.	<i>Algumas considerações do cálculo com matrizes e vetores</i>	163
5.	<i>Estimação dos coeficientes através de uma amostra de dados</i>	164
6.	<i>Obtenção dos valores a_1 a a_k da matriz, na qual o erro quadrático é minimizado</i>	166
7.	<i>Determinação das variâncias e incertezas dos coeficientes</i>	168

8.	<i>Determinação da resposta e sua variância</i>	170
9.	<i>Cálculo das incertezas dos coeficientes e da resposta média em uma regressão linear múltipla</i>	172
10	<i>Cálculo do intervalo de predição com o modelo</i>	173
APÊNDICE 2: ESCLARECIMENTOS SOBRE AS TERMINOLOGIAS UTILIZADAS EM DIFERENTES REFERÊNCIAS, RELACIONADAS AOS RESULTADOS DE UMA REGRESSÃO		175
1.	<i>Esclarecimentos relacionados aos resíduos de uma regressão</i>	175
2.	<i>Esclarecimentos relacionados às incertezas, variâncias e aos desvios padrão dos coeficientes</i>	175
3.	<i>Esclarecimentos relacionados às incertezas dos resultados</i>	176
APÊNDICE 3: INTERPRETAÇÃO DAS TERMINOLOGIAS INTERVALO DE CONFIANÇA E INTERVALO DE PREDIÇÃO		177
1.	<i>Repetitividade comparada com o intervalo de predição</i>	177
2.	<i>Intervalo de predição em regressão multilinear</i>	178
3.	<i>Incerteza expandida comparada com o Intervalo de confiança</i>	178
APÊNDICE 4: BALANÇOS DE INCERTEZAS COM MEMORIAIS DE CÁLCULO		180
1.	<i>Piranômetros:</i>	180
1.1	<i>Considerações especiais sobre as incerteza gerada pela variação na resposta direcional</i>	180
2.	<i>Calibração dos piranômetros</i>	181
2.1	<i>Memorial para o balanço de incertezas relativo a calibração dos piranômetros</i>	181
3.	<i>Medição com os piranômetros</i>	188
3.1	<i>Memorial para o balanço de incertezas de medição da radiação global</i>	188
3.2	<i>Memorial para o balanço de incertezas relativo a medição da radiação difusa</i>	192
4.	<i>Calibração dos transdutores de temperatura</i>	195
4.1	<i>Memorial da calibração dos transdutores de temperatura</i>	195
4.2	<i>Memorial do balanço de incertezas de medição com os transdutores de temperatura</i>	199
5.	<i>Medição da vazão</i>	202
5.1	<i>Memorial do balanço de incertezas de medição do transdutor de vazão</i>	202
5.2	<i>Balanço de incertezas de medição do transdutor de vazão</i>	201

APÊNDICE 5: DEDUÇÃO DOS SUBMODELOS DO ENSAIO EM REGIME QUASE DINÂMICO	207
1. Capacitâncias térmicas do coletor	207
2. Modelo óptico do coletor solar	209
2.1 Transmitância considerando os efeitos de absorção de uma cobertura	210
2.2 Refletância da radiação na transição de um médio para o outro para ângulos normais	211
2.3 Refletância da radiação na transição de um meio para outro para diferentes ângulos de incidência	211
2.4 Transmitância de uma cobertura considerando somente efeitos de reflexão	212
2.5 Transmitância τ_c de uma cobertura	213
2.6 Refletância ρ de cobertura	214
2.7 Absortância α de cobertura de uma cobertura real	215
2.8 Absortância da superfície seletiva do absorvedor	216
2.9 Efeitos do ângulo de incidência θ para a absortância do absorvedor	217
2.10 Absortância do absorvedor e transmitância da cobertura reduzida para um único valor de $(\tau\alpha)$ para radiação direta	217
2.11 Transmitância e absortância $(\tau\alpha)$ para a radiação difusa	220
2.12 Transmitância e a absortância $(\tau\alpha)$ para a radiação refletida	221
APÊNDICE 6: LISTA DE FABRICANTES DOS EQUIPAMENTOS	222
APÊNDICE 7: LOCALIZAÇÃO DOS PADRÕES	222
ANEXO 1: ESPECIFICAÇÕES E CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES E DAS UNIDADES DE MEDIÇÃO	227
ANEXO 2: CERTIFICADO DE UM ENSAIO DO TIPO QUASI DINÂMICO	248

RESUMO

Ensaio de coletores solares são atualmente, na maioria das instituições, feitos em ambiente externo (*outdoor*). Tradicionalmente, estes ensaios são feitos em regime permanente (norma ISO 9806, 1993). Grande estabilidade no nível da radiação solar e 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 esse tempo a bancada de ensaios. Desde 1997, a norma européia para ensaios de coletores solares (EN12975, 1997) permite que dados com quase todas as condições de tempo possam ser incluídos em um novo tipo de ensaio, que é denominado de *ensaio quase dinâmico de coletores solares*. Com essa opção, o ensaio pode ser concluído em uma semana. Mas, ainda existem dúvidas sobre a compatibilidade dos resultados, relacionadas aos dois tipos de ensaios (*outdoor* e *indoor*) feitos em regime permanente. Enquanto no modelo do ensaio em regime permanente utilizam-se somente dois, ou no máximo três coeficientes do modelo do coletor para realizar uma regressão linear múltipla, o ensaio em regime quase dinâmico requerer seis a nove componentes para essa regressão. Os procedimentos especificados pelas normas para se determinar as incertezas nas duas formas de ensaio estão aquém do estado-da-arte em metrologia e estatística. Enquanto as incertezas dos transdutores são especificadas, as incertezas dos resultados dos ensaios e os procedimentos para o cálculo dessas, baseados nas incertezas dos coeficientes e da resposta média do modelo, não são determinadas pelas normas. Como o ensaio em regime quase dinâmico é executado com condições de tempo variável, supunha-se para este ensaio incertezas maiores. Por outro lado, o ensaio em regime quase dinâmico é feito com condições de tempo mais representativas, em relação às condições de operação dos coletores. Neste trabalho é apresentada ineditamente a determinação das incertezas expandidas para as duas formas de ensaio. Com uma ampla série de dias ensaiados foi confirmado, o nível de confiança do modelo com que se estima a energia que um coletor solar converte. A partir dos dados de cada um dos ensaios realizados, os intervalos de predição e os de confiança para a resposta média do modelo são corrigidos, com fatores de correção

elaborados de forma iterativa para cada ensaio, com 95% de nível de confiança. A estabilidade parcial do modelo quase dinâmico é confirmada através das incertezas dos coeficientes. Problemas que podem aparecer na operação e avaliação desse novo tipo de ensaio são apresentados e melhoramentos são sugeridos. Um balanço para estimar a incerteza expandida da energia convertida durante um ensaio quase dinâmico é apresentado. É proposto um método de cálculo para se obter a incerteza expandida da conversão anual da energia com o coletor solar.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Desenho de corte de um coletor solar consistindo de cobertura (1), absorvedor (2), tubo elevador de fluido (3), isolamento térmico (4) e estrutura externa de suporte (5).....29
- Figura 2 – Potência térmica de um coletor como função da radiação solar G e da diferença entre temperatura média do coletor e a temperatura ambiente.....34
- Figura 3 – Exemplo da curva padronizada com a eficiência do coletor adimensional na sua ordenada em função da diferença da temperatura média do coletor menos a temperatura ambiente sobre a radiação solar35
- Figura 4 – Bancada de ensaios de coletores – legenda: coletor solar (1), anemômetro (2), chapa de proteção de vento (3), Ventilador radial (4), transdutor de medição da potência da radiação solar global, piranômetro (5)+(6), transdutor de medição da potência da radiação solar difusa, piranômetro com o dispositivo *anel sombreador* (7), transdutor para medição da temperatura de saída do coletor (8), transdutor para medir a temperatura ambiente (9).....61
- Figura 5 – Sistema hidráulico da bancada – legenda: válvulas gaveta (1) a (5); válvula de globo de duas vias (6) a (8); observador do fluido (9); válvula de regulação de vazão tipo agulha (10) e (11); filtro 200 μ m (12); filtro de entrada (13); medidor de vazão (14); respiro automático (15); medidor de pressão diferencial (16), manômetro (17); válvulas de respiro (18) a (20); alimentação de água (21) esvaziamento de água (22); vaso de expansão (23) e válvula de alívio (24).....62
- Figura 6 – Transdutor para a medição da radiação difusa – legenda: piranômetro (transdutor de radiação global) (1), dispositivo *anel sombreador* (2), ajuste do ângulo de inclinação β do piranômetro no centro do *anel sombreador* (3), ajuste da posição do anel no eixo geográfico da terra (4).76
- Figura 7 – Transdutor de temperatura Pt100, rosqueado em uma conexão de tubulação do tipo T de $\frac{3}{4}$ " da norma NPT utilizado para medir as temperaturas na entrada e saída do coletor assim como a temperatura da água ao lado do medidor de vazão volumétrico79

Figura 8 – Curva de calibração do anemômetro – legenda: freqüência medida do anemômetro de copo f_{me} ; intervalo de predição entre PI_{min} e PI_{max} , intervalo de confiança entre CI_{min} e CI_{max}	81
Figura 9 – Diferenças ϵ_i entre o valor da temperatura medida com a termorresistência padrão e o valor da termorresistência calibrada junto aos intervalos de confiança CI e de predição PI ajustados.....	84
Figura 10 – Potência da radiação solar G, potência térmica medida Q_{me} e potência estimada pelo modelo Q_{mo} em função de $n = 206$ valores médios de 5 min para o ensaio QDT de um coletor	89
Figura 11 – Gráfico com o valor das energias, que os diferentes subcomponentes do modelo do coletor convertem quando este é submetido a um ensaio - legenda: Q1 energia convertida através da radiação direta, Q2 parte de Q1 refletida pelo coletor, Q3 energia convertida através da radiação difusa, Q4 é a perda de energia para o ambiente por condução térmica, Q5 é a perda por efeitos de radiação e convecção	90
Figura 12 – Resíduos em um ensaio QDT- legenda: diferença entre a potência térmica medida Q_{me} e a estimada pelo modelo Q_{mo} , intervalo de predição $PI(Q_{mo,i})$ e intervalo de confiança $CI(Q_{mo,i})$ do QDT4.....	100
Figura 13 – Resíduos em um ensaio SST- legenda: diferença entre a potência térmica medida Q_{me} e a estimada pelo modelo Q_{mo} , intervalo de predição $PI(Q_{mo,i})$ e intervalo de confiança $CI(Q_{mo,i})$ do SST	100
Figura 14 – Intervalo de incerteza de regressão das curvas padronizadas de eficiência – legenda: QDT1 a QDT4 são os resultados obtidos (apresentados intercaladamente) dos quatro ensaios em regime quase dinâmicos nº 1 a nº 4	107
Figura 15 – Intervalo de incerteza de regressão da curva padronizada de eficiência – legenda: QDT3 são os resultados obtidos do ensaio em regime quase dinâmicos nº 3, SST são os resultados obtidos do ensaio em regime permanente	108
Figura 16 – Resíduos ϵ_i em função da da variável z_i da distribuição normal padronizada do melhor ensaio (QDT3), aproximados por uma reta com o seu coeficiente de determinação R^2	114

Figura 17 – Resíduos ϵ_i em função da da variável z_i da distribuição normal padronizada do pior ensaio (QDT4), aproximados por uma reta com o seu coeficiente de determinação R^2	114
Figura 18 – Pior resultado do exame de heteroscedasticidade – legenda: variância do termo de perturbação ϵ_i^2 sobre a variável X_2 do modelo QDT4	116
Figura 19 – Desenho esquemático do coletor com as resistências térmicas mais importantes por onde passa o fluxo de calor.....	207
Figura 20 – Circuito elétrico equivalente ao circuito do coletor	208
Figura 21 – Circuito elétrico simplificado equivalente ao circuito do coletor que é utilizado para ensaios de coletores	209
Figura 22 – Ângulo de refração quando os raios solares passam do ar para um outro meio	211
Figura 23 – Transmitância τ_r obtida de efeitos múltiplas de refletância r , que aparecem em uma cobertura sem consideração de efeitos de absorção nesta cobertura.....	212
Figura 24 – Transmitância τ_c obtida de efeitos múltiplas de refletância r , que aparecem em uma cobertura considerando os efeitos de absorção τ_a nesta cobertura.....	214
Figura 25 – Transmitância τ_c , refletância ρ , e absortância α em função do ângulo de incidência θ para uma cobertura não ideal de um único vidro	216
Figura 26 – Efeitos combinados que atuam em um coletor solar; legenda: radiação solar G , refletância sem considerar efeitos de absorção r , transmitância da cobertura τ , refletância a radiação difusa de uma cobertura ρ_d , absortância do absorvedor ($\alpha = 1 - \rho_a$).....	217
Figura 27 – Característica de $(\tau\alpha)_{e\theta}/(\tau\alpha)_{en}$ típica para (1 a 4) coberturas do coletor com o índice de refração médio de 1,526	219
Figura 28 – Efeitos combinados que atuam em um coletor solar com tubo montado acima do absorvedor – legenda: refletância sem considerar efeitos de absorção r , transmitância τ , refletância a radiação difusa de uma cobertura ρ_d , absortância do tubo α_1 , absortância do absorvedor α_2	220

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CA	Corrente Alternada
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
CC	Corrente Contínua
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITW	<i>Institut für Thermodynamik und Wärmeübertragung der Universität Stuttgart</i>
LABMETRO-	Laboratório de Metrologia e Automatização Industrial do Curso de
EMC-UFSC	Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina
LABSOLAR-	Laboratório de Energia Solar com Núcleo de Controle Térmico de
NTSC-UFSC	Satélites do Curso da Engenharia Mecânica da Universidade Federal
LATU-	Laboratório de Calibração de Temperatura e Umidade da
CERTI	Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
MLR	<i>Multiple Linear Regression</i>
Pt100	<i>Platinum resistance thermometer, com uma resistência elétrica de 100 Ω a 0 °C</i>
PTC	<i>Positive temperature coefficient resistor</i>
QDT	Ensaio de coletor em regime quase dinâmico (<i>Quasi-Dynamic Test</i>)
RMSE	Desvio padrão experimental
SST	Ensaio de coletor em regime permanente (<i>Steady State Test</i>)
TM	<i>Trade Mark</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>

SIMBOLOGIA

Símbolo	Descrição	Unidade
a_j	Coeficiente de regressão	individual
A	Área da cobertura transparente do coletor	m^2
A_t	Secção transversal de um tubo	m^2
b_o	Fator de sensibilidade para a função $(1/\cos(\theta)-1)$	-
C	Fator de correção para o transdutor de radiação difusa	-
c_1, c_2	Coeficientes de perdas provocadas pelo vento	individual
C_{ab}	Capacitância térmica do absorvedor	$J/(m^2K)$
C_f	Capacitância térmica do fluído no coletor	$J/(m^2K)$
Cl	Intervalo de confiança ou da incerteza da resposta média	Individual
c_p	Calor específico do coletor	$J/(kg K)$
C_s	Critério de seleção determinado pelas normas para validar as medições	individual
ΔT_m	Diferença da temperatura média do coletor entre a medição no tempo τ_i e τ_{i-1}	K
ΔT	Diferença entre temperatura média do coletor e temperatura ambiente	K
D	Diâmetro interno de um tubo	M
E_L	Radiação de onda longa	W/m^2
E	<i>Equação do tempo</i> para corrigir deslocamento na longitude	s
$E(\sigma)$	Desvio padrão experimental de uma regressão (<i>root mean square error</i>)	individual
$E(\sigma^2)$	Variância experimental de uma regressão (<i>residual mean square error</i>)	individual
F_D	Fração difusa, $F_D = G_d/G_b$	-
G	Potência da radiação solar	W/m^2
G_a	Radiação solar absorvida pela cobertura	W/m^2
G_d	Radiação difusa	W/m^2

G_b	Radiação direta	W/m^2
G_r	Parte refletida da radiação solar	W/m^2
G_t	Radiação solar transmitida pela cobertura	W/m^2
G_{up}	Radiação solar ao lado superior do coletor	W/m^2
K	Coeficiente de extinção da cobertura	1/m
$K_{ob}(\theta)$	Fator de correção de η_{0-QDT} para ângulos não normais	-
K_{od}	Fator de correção de η_{0-QDT} para a radiação difusa	-
K_{or}	Fator de correção de η_{0-QDT} para a radiação refletida	-
k_1	Coeficiente global de perdas térmicas ($T_m \sim T_a$)	$W/(m^2K)$
k_2	Coeficiente global de perdas térmicas quadrático	$W/(m^2K^2)$
k_3	Coeficiente da capacitância térmica do coletor com fluido	$J/(m^2K)$
L	Espessura da cobertura	m
L_{lo}	Longitude do meridiano local	°
L_{st}	Longitude referente ao meridiano padrão do tempo local	°
\dot{m}	Vazão mássica do fluido	kg/s
n_1	Índice de refração do ar	-
n_2	Índice de refração da cobertura	-
$PI(\dot{Q}_{mo,i})$	Intervalo de predição para a potência térmica estimada pelo modelo $\dot{Q}_{mo,i}$	W/m^2
P_1	Diferença percentual entre a energia medida e a energia estimada pelo modelo	%
P_2	Diferença percentual entre a entre a potência térmica medida e a estimada pelo modelo	%
\dot{Q}_b	Potência térmica convertida através da radiação direta	W/m^2
\dot{Q}_d	Potência térmica convertida através da radiação difusa	W/m^2
\dot{Q}_c	Potência térmica capacitiva correspondente ao intervalo de tempo entre τ_i e τ_{i-1} , proporcional a capacitância térmica ($C_f + C_{ab}$)	W/m^2
\dot{Q}_{hl}	Taxa de calor perdido pelo coletor	W/m^2

\dot{Q}_{me}	Potência térmica medida do coletor	W/m ²
\dot{Q}_{mo}	Potência térmica do coletor estimada pelo modelo	W/m ²
\dot{Q}_s	Potência térmica convertida desconsiderando-se as perdas térmicas do coletor	W/m ²
r	Refletância	-
Re	Número de Reynolds	-
R _{1,ab-a}	Resistência térmica devida à condução	(m ² K)/W
R _{2,ab-a}	Resistência térmica devida à radiação e convecção combinadas	(m ² K ²)/W
R _{m-ab}	Resistência térmica entre o fluido e o absorvedor	(m ² K)/W
s(x _i)	Desvio padrão experimental de x _i medições	Individual
s(\bar{x})	Desvio padrão experimental da média	Individual
S	Fator de visibilidade	-
SoT	Hora solar	s
SS _E	Soma dos mínimos quadrados de $\dot{Q}_{mo} - \dot{Q}_{me}$	W ² /m ⁴
ST	Hora padrão relativa a um meridiano de referência de tempo local	s
T _a	Temperatura ambiente	°C
T _{ab}	Temperatura do absorvedor	°C
T _{in}	Temperatura de entrada do coletor	°C
T _{out}	Temperatura de saída do coletor	°C
T _m	Temperatura média do coletor	°C
T _s	Temperatura do céu equivalente	°C
t _{α/2,n-k}	Fator de abrangência	-
t _{α/2,n-k,aj}	Fator de abrangência ajustado	-
U(a _j)	Incerteza do coeficiente de regressão	individual
U(\dot{Q}_{mo})	Incerteza da potência térmica estimada = U(\hat{Y})	W/m ²
U(ε _i)	Incerteza do valor de ε (regressão ponderada)	W/m ²
U(η)	Incerteza da eficiência	-
V	Ângulo de obstrução do anel de sombreamento a partir do centro do domo do piranômetro	°

\dot{V}	Vazão volumétrica dentro de um tubo	m^3/s
$var(a_j)$	Variância do coeficiente de regressão	individual
$var(\hat{Q}_{mo})$	Variância da potência térmica estimada	$[W/m^2]^2$
$var(D)$	Variância da diferença entre potência térmica estimada pelo modelo e a potência medida para definir o intervalo de predição	W/m^2
V_f	Velocidade do fluido no interior dos tubos do coletor	m/s
$[W]$	Matriz das variáveis utilizadas na regressão ponderada	-
$[X]$	Matriz das variáveis	-
$\{X_{0,i}\}$	Vetor horizontal da matriz $[X]$ que corresponde as variáveis de X_j medido no mesmo tempo i	individual
$X_{j,i}$	Variáveis de regressão	individual
\hat{Y}	Resposta estimada com um modelo	individual
z_{crit}	Variável da distribuição normal padronizada crítico	-
z_i	Variável da distribuição normal padronizada	-
α	Absortância de uma superfície	-
α_n	Absortância em condições normais ($\theta = \theta_n = 0$)	-
β	Ângulo de inclinação do coletor em relação ao horizonte	$^\circ$
γ	Ângulo de azimute com que o coletor é posicionado	$^\circ$
ΔT	Diferença entre temperatura média do coletor e temperatura ambiente	K
$\Delta \tau$	Tempo entre τ_i e τ_{i-1} ; ($\Delta \tau = 6s$)	s
δ	Ângulo da declinação da terra	$^\circ$
ε	Emitância de uma superfície	-
ε_i	Resíduo entre a potência térmica medida e a potência estimada pelo modelo (relacionados a uma amostra utilizada para a regressão)	W/m^2
ε_i	Resíduo entre a potência térmica medida e a potência estimada pelo modelo (relacionados à população)	W/m^2
η	Eficiência do coletor	-
η_{me}	Eficiência medida do coletor	-
η_{mo}	Eficiência estimada pelo modelo do coletor	-

η_{0-SST}	Eficiência do coletor sem perdas térmicas obtida do SST	-
η_{0-QDT}	Eficiência do coletor sem perdas térmicas obtida do QDT	-
$\eta_{0-QDT(SST)}$	Eficiência do coletor sem perdas térmicas, obtida do QDT e normalizada para as condições do SST	-
θ	Ângulo entre o raio da radiação solar direta incidente e o vetor normal à superfície do coletor	°
θ_{ed}	Ângulo de incidência equivalente para radiação direta que resulta na mesma transmitância para radiação difusa	-
θ_{er}	Ângulo de incidência equivalente para a radiação refletida	°
θ_n	Ângulo de incidência normal	°
θ_{rf}	Ângulo de refração	°
μ	Viscosidade dinâmica de um fluido	kg/ms
v_w	Velocidade do vento no plano da cobertura do coletor	m/s
ν	Viscosidade cinemática de um fluido	m ² /s
ρ	Refletância de uma superfície	-
ρ_a	Refletância do absorvedor	-
ρ_d	Refletância da cobertura à parte difusa refletida do absorvedor	-
ρ_f	Massa específica do fluido	kg/m ³
σ	Constante de Stefan Boltzmann ($5,6703 \times 10^{-8}$)	W/(m ² K ⁴)
$\sigma^2(\dot{Q})$	Variância residual da população sem <i>bias</i> obtida da regressão utilizando potências térmicas	[W/m ²] ²
$\sigma^2(\eta)$	Variância residual da população sem <i>bias</i> obtida da regressão utilizando eficiências	[W/m ²] ²
$\sigma(a_j)$	Desvio padrão de um coeficiente de regressão	individual
$\sigma(\dot{Q}_{mo})$	Desvio padrão da resposta do modelo = $\sigma(\hat{Y})$	W/m ²
$\sigma(x_i)$	Desvio padrão de x_i medições	Individual
$\sigma(\bar{x})$	Desvio padrão da média	Individual

τ_a	Transmitância de um meio parcialmente transparente, considerando somente efeitos de absorção neste meio (lei de Bouguer)	-
$\tau_c; \tau$	Transmitância da cobertura considerando efeitos de reflexão e absorção nesta	-
τ_i, τ_{i-1}	Instantes de tempo	s
τ_r	Transmitância da cobertura considerando somente efeitos de reflexão	-
$(\tau\alpha)_\theta$	Coeficiente de transmitância e absortância para G_b	-
$(\tau\alpha)_n$	Coeficiente de transmitância e absortância normal	-
$(\tau\alpha)_\theta/(\tau\alpha)_n$	Fator de correção de η_{0-QDT} para ângulos não normais	-
$(\tau\alpha)_{e\theta}/(\tau\alpha)_{en}$	Fator de correção efetiva (medida), de η_{0-QDT} para ângulos não normais	-
ϕ	Ângulo da Latitude de um local geográfico	°
$\phi(z_i)$	Probabilidade cumulativa normal	-
$\chi^2 = SS_{E,p}$	Soma ponderada dos quadrados dos resíduos	-
ω	Ângulo solar horário	°
ω_s	Ângulo correspondente ao nascer e por do sol em relação ao meio dia solar	°

1 INTRODUÇÃO

O uso da energia solar para aquecimento reduz a emissão de gás carbônico na atmosfera em cerca de 1400 kg/MWh, considerando-se a emissão deste gás para produzir a energia termoelétrica equivalente convertida em calor (TSOUTSOS et al., 2005). A energia solar totalizada anual que incidente no plano horizontal sobre o território brasileiro varia entre (1,620 a 2,227) MWh/m², conforme dados da distribuição de energia solar média diária incidente no Brasil (COLLE & PEREIRA 1998).

Ensaio de coletores solares (EN12975, 1998 do Comitê Europeu de Normatização, e ISO9806, 1993 da Organização Internacional de Normatização) determinam as características de confiabilidade e as de eficiência destes coletores. O conhecimento sobre a eficiência possibilita otimizar a relação custo/benefício e classificar o desempenho dos coletores no setor produtivo. Na Europa, sistemas solares são subsidiados com vários fundos dos governos federais, estaduais e municipais¹, com o objetivo de incentivar a quantidade e qualidade da produção de coletores e sistemas solares¹. Nesse esquema de fomento, somente são subsidiados projetos em que os instaladores dos sistemas solares são certificados através de um curso e os coletores através de um ensaio especificado pelas normas ISO9806 ou EN12975². Para os projetos obterem subsídios, os coletores destes devem produzir no mínimo 350 kWh por unidade e ano na região climática onde forem instalados².

Com o modelo do coletor, que é um resultado dos ensaios de coletores, é possível calcular a energia que um coletor específico produzirá em uma região climática específica. Segundo a empresa PSE³, o custo de uma bancada de coletores de laboratório (ISO 9806, 1993 e EN12975, *indoor collector test*), utilizando um simulador solar, é de aproximadamente US \$450.000 dólares, incluindo o custo de exportação para o Brasil. Existem outras opções para se realizar ensaios de coletores solares, como é o caso do *ensaio de coletores em regime quase dinâmico*

¹ (EUROPEAN SOLAR THERMAL INDUSTRY FEDERATION, 2003)

² (BART VAN DER REE, 2001)

³ PSE (*Projektgesellschaft Solarer Energiesysteme GmbH*), empresa do tipo *SPIN OFF* do *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany*

que atualmente oferece a melhor relação custo/benefício. Esta nova modalidade de ensaio foi normatizada pelo Comitê Europeu de Padronização a partir do ano 1997 (EN12975, 1997). Um equipamento para o ensaio quase dinâmico pode ser construído no Brasil a um custo material de aproximadamente US \$70.000⁴.

No ano 2002, somente 3 institutos (dos 7 que obtiveram accretitação para realizar ensaios em *regime permanente*, norma EN12975), foram accretitados para realizar ensaios em *regime quase dinâmico* na Europa (CEN-SOLAR KEYMARK INTERIM REPORT, 2002). Uma crítica à norma EN12975 (CEN KOVÁCS, 2003) e uma ampla lista de emendas (CEN - AMENDMENT to EN12975-1&2, 2003) sugerem melhoramentos os quais podem ser justificadas pelas dificuldades na implementação da avaliação dos dados e pelas diversas interpretações da norma, que resultam na falta de confiabilidade nos resultados do ensaio.

Este trabalho é voltado para a reavaliação do conhecimento sobre os ensaios. O cálculo de incertezas aqui proposto, obtido através de medições realizadas durante 3 meses, resultou numa análise de incertezas para o ensaio quase dinâmico - seguindo as recomendações do guia ISO-GUM (2003) - e isto poderá contribuir para aumentar a confiabilidade sobre esta modalidade de ensaio. Para deixar os resultados conclusivos, foram, no presente trabalho, determinadas, sistematicamente, incertezas relativas ao que se segue:

- Transdutores, através da calibração e especificação destes e do sistema de medição;
- Coeficientes do coletor, através da regressão linear múltipla;
- Curva de eficiência padronizada, através das incertezas dos coeficientes;
- Resposta do modelo do coletor, através da incerteza dos coeficientes e variáveis da operação dos ensaios com medições dependentes e independentes;
- Energia convertida para um ensaio, através da incerteza da resposta do modelo, da incerteza de correlação, das variáveis e da incerteza sistemática dos piranômetros;

⁴ LABSOLAR-Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina

A estabilidade estatística dos coeficientes do coletor é verificada com o uso de vários ensaios independentes feitos com o mesmo coletor, onde um método estatístico elaborado é aplicado para se verificar os modelos e as regressões dos mesmos (CLOGG et al., 1995). Curvas padronizadas de eficiência, com as suas incertezas de regressão obtidas de ensaios em regime quase dinâmico e regime permanente são comparadas.

2 COLETORES SOLARES

Coletores solares são dispositivos que convertem a energia radiante solar para calor em termos da energia interna ou da entalpia de sólidos, líquidos ou gases. Os coletores mais utilizados são os destinados ao aquecimento da água residencial. A faixa de temperatura de operação desses coletores situa-se de 20°C a 95°C. A água aquecida é transportada para um reservatório com isolamento térmico para ser utilizada nos horários de demanda. Esses coletores consistem tipicamente de seguintes componentes:

- um absorvedor que converte a radiação solar em calor;
- tubos fixados neste absorvedor, através dos quais circula o fluido para ser transportado até o local da demanda de calor;
- uma cobertura transparente e uma caixa com isolamento térmico para reduzir as perdas térmicas para o ambiente (figura 1).

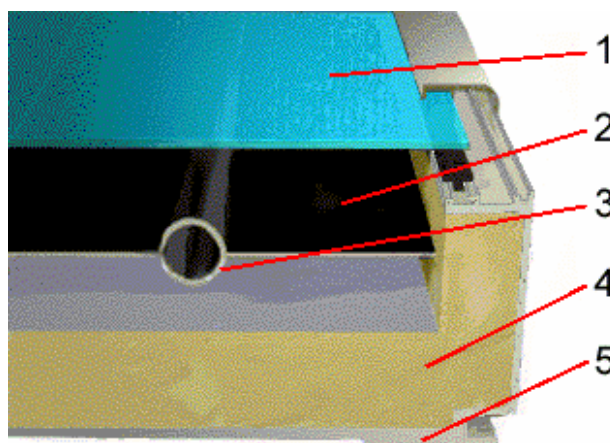


Figura 1 – Desenho de corte de um coletor solar consistindo de cobertura (1), absorvedor (2), tubo elevador de fluido (3), isolamento térmico (4) e estrutura externa de suporte (5)

A eficiência dos coletores é dependente, principalmente, de suas características térmicas e ópticas. Sem perdas térmicas, estes coletores teriam uma eficiência de aproximadamente (65 a 85)% onde (15 a 35)% da energia não pode ser transformada em calor por causa da reflexão. Coletores que operam em baixas temperaturas (para aquecimento de piscinas) não necessitam, em algumas aplicações, da estrutura externa de suporte e da cobertura.

2.1 Modelo simplificado do coletor solar

2.1.1 Potência térmica do coletor

A potência de aquecimento \dot{Q} [W] associada a um fluxo de massa \dot{m} [kg/s] de um escoamento estacionário de um fluido de calor específico c_p [J/(kgK)], de massa específica ρ_f [kg/m³], e as temperaturas de entrada T_{in} e de saída T_{out} [°C], são determinadas pela primeira lei da termodinâmica como segue,

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) = \dot{V} \rho_f c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

onde calor específico e a vazão volumétrica \dot{V} [m³/s] devem ser avaliados na temperatura média T_m como segue

$$T_m = (T_{in} + T_{out}) / 2 \quad (2)$$

A potência de aquecimento medida \dot{Q}_{me} [W/m²], de um coletor solar é normalmente apresentada em função da *área de abertura* A [m²] (conforme normas EN12975 e ISO9806) e da diferença entre a temperatura de saída T_{out} e a temperatura de entrada T_{in} , pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{me} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) / A = \dot{V} \rho_f c_p (T_{out} - T_{in}) / A \quad (3)$$

A potência térmica \dot{Q}_{me} do coletor depende principalmente da radiação solar e da diferença entre a temperatura média do absorvedor do coletor e a temperatura ambiente. Com radiação solar mais intensa, o absorvedor aquece mais e assim mais energia é disponível para aquecer a água que passa pelo absorvedor do coletor.

2.1.2 Eficiência de η_0 do coletor

A potência térmica \dot{Q}_s [W/m²] de um coletor solar é igual à potência de entrada (aqui potência da radiação solar G), multiplicada pela eficiência η_0 do coletor na ausência de perdas térmicas, conforme a equação que segue:

$$\dot{Q}_s = \eta_0 G \quad (4)$$

2.1.3 Coeficiente de perda térmica do coletor

A transferência de calor ocorre em três diferentes modalidades, a saber:

- condução: transferência de calor entre meios sólidos (ou fluidos estáticos);
- convecção: transferência de calor em fluidos em movimento;
- radiação: transferência de calor na forma radiante (não necessita de um meio material).

O fluxo de calor por condução é definido pela expressão simplificada da lei de Fourier, que é expressa a seguir:

$$\dot{Q}_{ht} = \frac{k_c}{L} (T_1 - T_2) = U_1 (T_1 - T_2) \quad (5)$$

Onde L [m], é a espessura do material, k_c [W/(m K)] a condutividade térmica e $T_1 - T_2$ [K] a diferença de temperatura entre as faces desse material (INCROPERA, 1992).

Nos cálculos aplicados a coletores solares a equação 5 é preferivelmente expressa em termos de U_1 [W/m²K], que é denominado *coeficiente global de perdas térmicas* (ISO9806 e EN12975).

A diferença de temperatura ΔT é definida pela equação (6), sendo T_{ab} a temperatura do absorvedor. Esta temperatura é de difícil medição. Por conseguinte, esta temperatura é substituída, com boa aproximação, pela temperatura média (T_m) (ISO9806 e EN12975).

$$\Delta T = T_{ab} - T_a = T_m - T_a = (T_{in} + T_{out}) / 2 - T_a \quad (6)$$

No aquecimento do fluido de um coletor, somente é possível aproveitar aquela parte da energia que não foi perdida para o ambiente. Fazendo-se um balanço de energia, obtém-se a equação básica para ensaios do tipo SST de coletores solares como segue

$$\dot{Q}_{mo} = \underbrace{\eta_{0-SST}}_{a_1} \underbrace{G}_{X_1} + \underbrace{k_1}_{a_2} \underbrace{\Delta T}_{X_2} \quad (7)$$

onde o coeficiente global de perdas térmicas k_1 é negativo. Neste contexto, k_1 é igual a U_1 e o coeficiente η_{0-SST} corresponde a eficiência do coletor sem perdas térmicas, obtida do SST.

2.1.4 Aproximação dos efeitos complexos de perdas térmicas do coletor

O coletor solar é um aquecedor que apresenta além da perda de condução térmica, outros tipos de perdas térmicas. Entre o absorvedor e a cobertura do coletor, há perdas de convecção e de radiação térmica. Entre a cobertura e o ambiente, há perdas de convecção principalmente provocadas pelo vento. Da cobertura, que é geralmente a parte externa do coletor que tem a maior temperatura, há perdas de radiação térmica para o céu. O céu varia a sua temperatura equivalente de corpo negro de acordo com a cobertura de nuvens. Sem nuvens, ele possui uma temperatura equivalente menor.

A combinação de todos os efeitos de perdas térmicas determina as características do coletor, modeladas pela equação (7). Estes efeitos térmicos do coletor podem ser aproximados melhor com um polinômio de segunda ordem incompleto (equações 8 e 9) para coletores fechados (figura 1), quando as coberturas dos coletores são expostas a ventos constantes (ISO 9806 e EN12975).

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_2^2 \quad (8)$$

Para se obter os coeficientes do polinômio, pode-se utilizar uma regressão linear (item 6.3 e EN12975). Os coeficientes a_1 , a_2 e a_3 e as variáveis X_1 , X_2 e X_3 desta regressão estão especificados na equação (9). Observa-se, que a variável X_2^2 da equação (8) é substituída pela variável $X_3 = \Delta T^2$.

O coeficiente global de perdas térmicas quadrático k_2 [W/(m²K²)] determina o aumento das perdas térmicas de ordem quadrática em relação à diferença de temperatura ΔT .

$$\dot{Q}_{mo} = \underbrace{\frac{\dot{Q}_s}{\eta_{0-SST}}}_{a_1} \underbrace{G}_{X_1} + \underbrace{k_1}_{a_2} \underbrace{\Delta T}_{X_2} + \underbrace{k_2}_{a_3} \underbrace{\Delta T^2}_{X_3} \quad (9)$$

A norma EN12975 determina que para coletores abertos (aquecedores de piscinas) o modelo da equação (9) deve ser corrigido para levar em conta os efeitos da radiação extraterrestre de onda longa e também os efeitos do vento (item 3.7.7).

2.1.5 Visualização gráfica das características térmicas do coletor solar

A radiação solar em ambientes externos varia durante o dia de 0 até valores da ordem de 1100 W/m². A figura 2 ilustra os efeitos da radiação solar G e da diferença de temperatura ΔT sobre a potência térmica de um coletor.

Quando a temperatura média deste coletor for igual a 60 K acima da temperatura ambiente, este só começará a converter energia quando a radiação solar for superior a 700 W/m² (figura 2). Isto decorre por causa das perdas térmicas deste coletor. A perda térmica \dot{Q}_{ht} é igual a energia que o coletor produz \dot{Q}_s nessa temperatura (equação 9). O melhor aproveitamento da radiação solar é obtido em baixas diferenças de temperatura entre o coletor e o ar ambiente, assim como para altos valores de radiação solar. O termo \dot{Q}_s na equação (9) é responsável pelo aumento proporcional da potência térmica com a radiação solar, caso as perdas térmicas do coletor mantenham-se constantes. Pode-se ainda observar na figura 2 que para a radiação constante, a função $\dot{Q} = f(T_m - T_a)$ apresenta-se levemente curva.

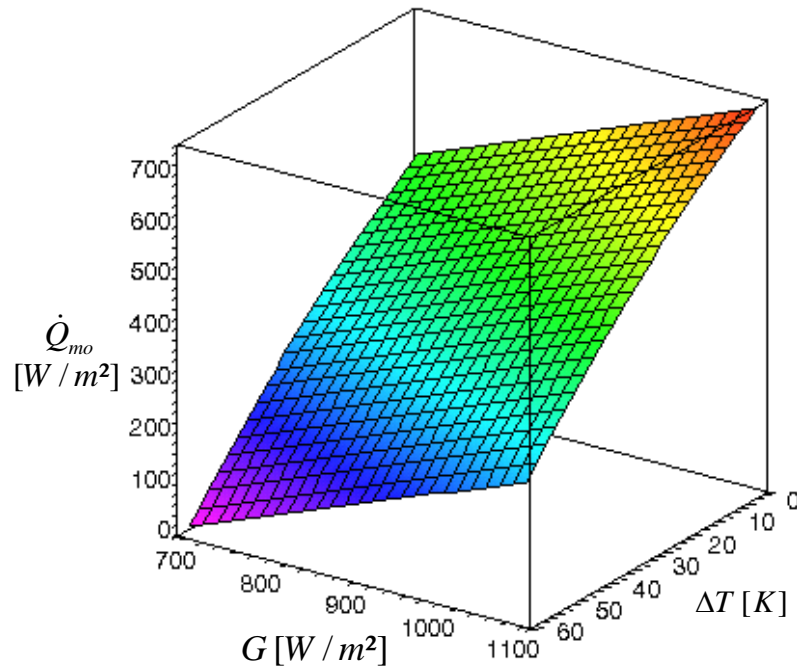


Figura 2 – Potência térmica de um coletor como função da radiação solar G e da diferença entre temperatura média do coletor e a temperatura ambiente

2.1.6 Curva padronizada da eficiência do coletor

Por causa da ausência de um coeficiente sem variável na equação (7), a potência de aquecimento tem a sua intersecção com a origem (0 W/m^2). A intersecção aparece quando a potência das perdas térmicas \dot{Q}_{hl} possui o mesmo valor que a energia produzida pelo coletor \dot{Q}_s . Para uma melhor visualização desta equação, seus dois lados são divididos pela radiação G , o que resulta em uma equação simples de $y = aX + b$, de uma reta (equação 10), onde o y é o valor da eficiência medida η_{0-me} do coletor, quando este não tem perdas térmicas com a condição de $T_m = T_a$, $\Delta T \rightarrow 0$.

$$\underbrace{\frac{\overbrace{(T_{out} - T_{in}) \dot{m} C_p}^{\eta_{-me}}}{AG}}_Y = \underbrace{\eta_{0-SST}}_b + \underbrace{\frac{k_l \Delta T}{G}}_{aX} \quad (10)$$

Dividindo, equivalentemente, a equação (9) pela radiação global G , obtém-se a equação (11) com a qual a curva padronizada de eficiência (ISO9806 e EN12975) é traçada (figura 3).

$$\frac{\overbrace{(T_{out} - T_{in}) \dot{m} C_p}^{\eta_{-me}}}{A G} = \overbrace{\underbrace{\eta_{0-SST}}_{a_1}}^{\text{propriedades óticas}} + \overbrace{\underbrace{k_1 \frac{\Delta T}{G}}_{\frac{a_2}{x_2}} + \underbrace{k_2 \frac{(\Delta T)^2}{G}}_{\frac{a_3}{x_3}}}_{\text{propriedades de perda de calor}}^{\eta_{-mo}} \quad (11)$$

Esta curva é utilizada para a demonstração do desempenho do coletor. Pode-se observar nesta que com o aumento da temperatura ΔT ou com a redução da radiação solar, a eficiência do coletor é reduzida. Os efeitos da radiação e da temperatura não podem ser observados separadamente nesta curva.

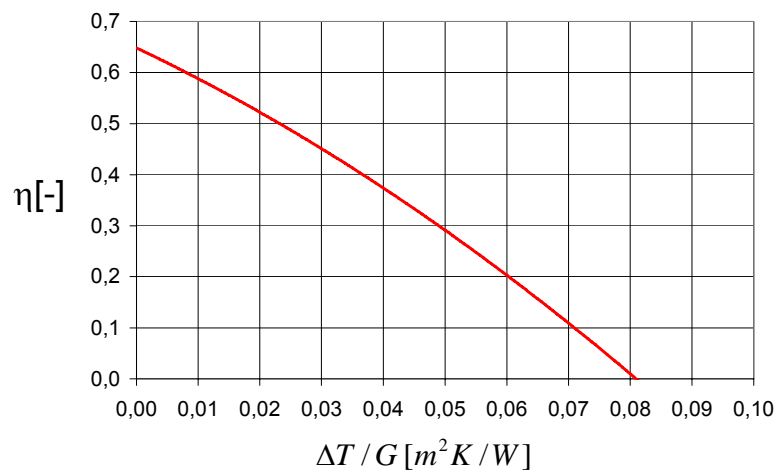


Figura 3 – Exemplo da curva padronizada com a eficiência do coletor adimensional na sua ordenada em função da diferença da temperatura média do coletor menos a temperatura ambiente sobre a radiação solar

2.2 Modelo completo do coletor solar

O modelo completo do coletor apresentado com a equação (12) consiste de vários submodelos deduzidos no apêndice 5, pg. 207 com os quais o modelo em regime permanente é aperfeiçoado. Estes submodelos são especificados pela norma EN12975, onde a equação (151), pg. 219 determina a energia convertida através da radiação direta $G_b [W/m^2]$, a equação (153), pg. 221 determina a energia convertida através radiação difusa $G_d [W/m^2]$ e a equação (128), pg. 209 determina a parte dinâmica do coletor através da variação da temperatura média do coletor ΔT_m no intervalo de tempo $\Delta \tau$. As partes de $\dot{Q}_{hl,1}$ e $\dot{Q}_{hl,2}$ da equação (9), pg. 33 determinam

as perdas térmicas. O coeficiente η_{0-QDT} corresponde a eficiência do coletor sem perdas térmicas obtida do QDT, b_0 ao fator de sensibilidade para a função $(1/\cos(\theta)-1)$ que determina as perdas de reflexão e de absorção da radiação G_b para ângulos de incidência θ diferentes da normal (equação 150, pg. 218), $K_{\theta d}$ corresponde ao fator de correção de η_{0-QDT} para a radiação difusa e k_3 [J/(m²K)] corresponde ao coeficiente da capacitância térmica do coletor com o fluido que este inclui.

Ao modelo do tipo QDT da equação (12) será aplicado uma regressão linear múltipla (item 6.3). Nesta regressão X_1 a X_6 da equação (12) são as variáveis de regressão e a_1 a a_6 dessa equação são os coeficientes obtidos da regressão.

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\dot{Q}_{mo}}_{Y - \text{potência estimada}} = & \underbrace{\overbrace{\eta_{0-QDT} G_b + \eta_{0-QDT} b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) G_b + \eta_{0-QDT} K_{\theta d} G_d}_{\text{propriedades óticas}}}_{\text{modelo para radiação direta} = K_{\theta b}(\theta) \eta_{0-QDT} G_b} \\
 & + \underbrace{\overbrace{k_1 \Delta T + k_2 \Delta T^2}_{\text{características de perda de calor}} + \underbrace{\overbrace{k_3 \frac{\Delta T_m}{\Delta \tau}}_{\text{características da inércia térmica}}}}_{\text{modelo para a radiação difusa}} \quad (12)
 \end{aligned}$$

Segundo a norma EN12975, este modelo é restrito a coletores com cobertura e isolamento térmico, como apresentado na figura 1.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aplicações dos coletores solares

Coletores solares podem ser aplicados para várias finalidades. Exemplos: aquecimento de água para o uso doméstico, calefação, refrigeração e ar condicionado e processos industriais com temperaturas de até 200 °C (KALOGIROU, 2003).

3.1.1 *Sistemas de aquecimento com circulação forçada*

São sistemas que têm o seu transporte de energia otimizado, em que a circulação de água é forçada através de uma bomba d'água, que garante o transporte da água aquecida com menores perdas térmicas, acionada através de um controlador eletrônico específico para gerenciá-la.

3.1.2 *Sistemas de aquecimento com circulação natural*

São sistemas pequenos, com poucas unidades de coletores. Estes são auto-controlados pelo efeito físico, que também é denominado *efeito de termo-sifão*, em que a água quente ao se expandir fica mais leve e assim procura subir pela força da gravidade. Sistemas deste tipo são os mais difundidos no mercado brasileiro.

3.2 Necessidade de ensaio de coletores

O coletor solar é um aquecedor cuja eficiência depende de condições climáticas (radiação solar e temperatura ambiente) e de operação (sua temperatura de entrada e sua temperatura média). Para selecionar um coletor adequado para um ambiente com condições climáticas específicas onde este será instalado, é necessário fazer uma simulação que determine a quantidade de energia que o coletor produzirá neste ambiente (item 6.13 e Anexo 2, p.7). Os coeficientes, determinados por um ensaio de coletor (EN12975 e ISO9806) junto a um perfil padrão de consumidor (geralmente é utilizado o perfil típico de uso de água quente em uma casa) e condições climáticas típicas padronizadas *TMY*, são a base para esta simulação. As condições

climáticas típicas são representadas de forma padronizada por dados de um ano típico meteorológico, *TMY* (MARION & URBAN, 1995). Estas representam principalmente as grandezas, temperatura ambiente e radiação solar horária e podem ser obtidas através de aproximadamente dez anos de medições de temperatura ambiente e da radiação solar. Com um método originalmente determinado por PETRIE & MCCLINTOCK M. (1978), que foi melhorado por MARION & URBAN (1995), podem ser selecionadas as semanas mais representativas ou mais próximas da média da radiação destes dez anos. Os coeficientes do coletor e as outras condições podem ser tanto aplicados para uma simulação de um sistema do tipo *termosifão*, como para simulação de um sistema com circulação forçada através de uma bomba. Com o resultado da simulação, obtém-se um único número expressa em [Wh], que representa a energia que o coletor irá produzir (Anexo 2, p. 7) durante o *TMY*. A vantagem do resultado desta simulação é a possibilidade de relacionar o desempenho do coletor para um ambiente ou um sistema específico e determinar assim qual tipo de coletor, representado pelo modelo deste, apresenta a melhor relação custo/benefício (DUFFIE & BECKMANN, 1991). Outra finalidade para a qual se utiliza o resultado da simulação é a realização de um cálculo de amortização do custo de investimento de um sistema solar (DUFFIE & BECKMANN, 1991).

3.3 Métodos para medir a eficiência de sistemas de aquecimento solar

Coletores são utilizados para aquecer a água que é transportada durante o dia para um reservatório termicamente isolado, e que será disponibiliza no horário de demanda. Os componentes que operam neste circuito hidráulico são denominados de *sistema de aquecimento solar doméstico*.

A eficiência de coletores pode ser medida utilizando-se somente o coletor (ISO9806 e EN12975), ou o coletor em um *sistema de aquecimento solar doméstico* (ISO9459-2)⁵, que pode ser configurado com (1 a 10) m² de área de coletores, dimensionado pelo fabricante para fornecer a energia para uma família típica. Para

⁵ Segundo essa norma o sistema pode ser do tipo: *circulação forçada* (item 3.1.1), *termo sifão* (item 3.1.2) ou *coletor com reservatório integrado*.

projetar um sistema com uma configuração diferente deste sistema padrão e para obter características específicas do coletor, será necessário realizar a realização de um ensaio para medir a eficiência do coletor (ISO9806 e EN12975).

3.4 Referências para ensaios de coletores

Para se obter resultados comparáveis em ensaios de eficiência de coletores, executados por diferentes instituições, é preciso adotar procedimentos padronizados aos institutos que realizam estes ensaios. Dois diferentes métodos de ensaios de coletores são atualmente adotados pelas normas: o primeiro é o da organização internacional de normatização ISO9806-1 (1993), que normatiza o ensaio em regime permanente, e o segundo é o do comitê europeu de normatização EN12975-2, que normatiza o mesmo ensaio, e, como alternativa, um ensaio em regime quase dinâmico. Ambos os ensaios são executáveis com a mesma bancada de ensaio do tipo *outdoor* (medição em ambiente externo) e a mesma sistemática de avaliação, que é baseada em seleção de medições representativas, formação de médias das medições e regressão linear múltipla por mínimos quadrados para obter os coeficientes do coletor.

3.4.1 Ensaio de coletores em regime permanente

As primeiras análises de coeficientes, que determinam a eficiência de um coletor solar, foram elaborados por HOTTEL & WOERTZ (1948). BLISS (1959) derivou diferentes fatores de eficiência de coletores e apresentou-os no periódico internacional SOLAR ENERGY (número três), na época recém-criado. Vários efeitos dentro do coletor foram empiricamente e analiticamente elaborados nesta época.

Na norma ASHARE 93-86 (1978) foi apresentado um modelo simples de ensaio de coletores, descrito pela equação (7), que representa uma simplificação de vários efeitos térmicos dentro do coletor. Em 1992, foi aprovada a norma internacional ISO9806, que utiliza este modelo para ensaiar os coletores em laboratório com simulador solar (*indoor*) ou em ambiente externo (*outdoor*).

O ensaio em regime permanente foi amplamente abordado pelos autores DUFFIE & BECKMANN (1991) e foi normatizado pela norma internacional ISO9806, pela norma europeia EN12975, pela norma americana ASHARE93-86 (1978) e pela norma

brasileira ABNT-NBR10184 (1988). Na norma internacional ISO9806 são citados como referências básicas os autores DUFFIE & BECKMANN (1991), GILLET & MOON (1985).

As três normas, ISO9806, EN12975 e ASHARE93-86, caracterizam basicamente o mesmo ensaio SST com as mesmas condições de contorno, que deve ser feito com o coletor, determinando o procedimento, a incerteza de medição dos transdutores e os critérios para a seleção das medições deste ensaio. As normas permitem que os ensaios possam ser realizados tanto em ambiente externo (*outdoor*), como em ambiente de laboratório (*indoor*).

A norma ISO9806 recomenda utilizar um rastreador solar automatizado, o qual aponta a normal do coletor sempre para o sol, para diminuir o tempo de conclusão do ensaio em regime permanente, executado *outdoor*.

3.4.2 Ensaio em regime quase dinâmico

A criação desta norma é um avanço relevante para o conceito de qualificação de coletores solares. As principais vantagens deste ensaio são:

- Permite que ensaios de coletores possam ser feitos em locais com alta incidência de umidade e nuvens (ex. áreas tropicais e subtropicais);
- O baixo custo da bancada de ensaio, comparando-se esta com a bancada de ensaio de laboratório (*indoor*);
- Não é necessário rastrear o coletor para o sol com um sistema de rastreamento automatizado;
- Uma redução do tempo necessário para completar o ensaio (necessita aproximadamente de um décimo do tempo do ensaio SST em condições *outdoor*, quando o coletor não é rastreado para o sol);
- O ensaio automatizado gera baixo custo de operação;
- A análise é rápida através de recursos computacionais;
- A análise do coletor é realizada de forma mais completa, em comparação com o ensaio em regime permanente;
- Dos resultados dos ensaios são extraídos no mínimo 6 coeficientes do modelo do coletor, que determinam mais detalhadamente as características de desempenho (equação 12, pg. 36).

Modelos para o ensaio em regime dinâmico foram desenvolvidos por vários autores: KLEIN et al. (1974) analisaram condições de transientes em coletores solares; WIJEYSUNDERA (1978) compara diferentes modelos de transientes para coletores solares; DUFFIE & BECKMANN (1991) no seu capítulo 6.12 descrevem os efeitos do calor específico em coletores solares e nos seus capítulos 5.4 - 5.6 os modelos e as características ópticas do coletor que foram posteriormente utilizados pela norma EN12975; PROCTOR (1984), GUIGAS et al. (1991), MUSHAWECCK & SPIRKEL (1993) e PAUSCHINGER (1994) seguiram este trabalho aperfeiçoando e comparando os resultados das diferentes estratégias e modelos. Os modelos desenvolvidos por esses autores não podem ser reduzidos para o modelo normatizado do ensaio em regime permanente. PERERS (1993) acrescentou vários submodelos ao modelo em regime permanente, capazes de interpretar os efeitos variáveis produzidos pela atmosfera. Para obter a expressão exata de cada submodelo, PERERS (1997) utilizou um método que chamou de *regressão linear múltipla estendida (extended MLR procedure)*, com o qual é possível obter características desconhecidas lineares ou não lineares de cada submodelo de um processo.

Neste método, o autor divide a faixa de medição da variável desconhecida em vários segmentos e realiza para cada segmento a regressão linear múltipla, obtendo assim, para cada segmento, um coeficiente com o qual é obtida a função do submodelo.

SCNNIEDERS (1997) valida os resultados do modelo dinâmico de um nó (figura 21, pg. 209), utilizado também por PERERS (1997), comparando-os com resultados obtidos de modelos dinâmicos de vários nós. Ele conclui que a utilização do modelo de dois nós (ambos nós são separados pela resistência térmica R_{m-ab} , na figura 19 e figura 20 pg. 207) pode ser utilizado para uma regressão, obtendo resultados similares com os do modelo de 3 nós, caso a capacitância térmica do fluido ou do absorvedor do coletor é conhecida. O modelo de 3 nós foi solucionado pelo autor com ferramentas numéricas, dividindo o coletor em várias seções transversais. Para que não ocorressem erros de ângulos, que influenciariam o estudo, ele rastreou o coletor nos ensaios na direção do sol.

O trabalho de PERERS (1997) foi intensificado pelos autores FISCHER & HAHNE (1998) e FISCHER et al.(2004) em que estes apresentaram a diferença entre o ensaio em regime permanente e em regime quase dinâmico. Na norma EN12975, que foi elaborada nos anos 1996 a 1998, são citadas como referências básicas

SPIRKL (1990), MUSHAWECK & SPIRKL (1993), PAUSCHINGER (1994) e PERERS (1993), PERERS et al. (1993) e PERERS (1997) para o ensaio em regime quase dinâmico. Esta norma permite unicamente que os ensaios QDT sejam realizados somente com a temperatura de entrada do coletor estabilizada e que os dados de dias com nuvens, que geram variação na radiação solar, possam ser utilizados para a avaliação do ensaio e, conseqüentemente, para o cálculo dos coeficientes do coletor através da regressão. Sendo assim é reduzido o tempo necessário para completar um ensaio, especialmente em regiões que raramente possuem dias sem nuvens durante o ano inteiro e apresentam assim pouca probabilidade de *condições de céu limpo (clear sky conditions, ISO9806)*, como é o caso de Santa Catarina. Para a execução de um ensaio de coletor em regime permanente, é necessário o mínimo de quatro dias sem nuvens (ISO9806 e EN12975). Um ensaio em regime quase dinâmico pode ser realizado tendo somente: um dia basicamente sem ou com poucas nuvens e quatro outros dias em condições nubladas ou parcialmente nubladas (EN12975).

3.4.3 Regressão multilinear e incertezas nesta regressão

Nos livros sobre estatística em engenharia (MONTGOMERY & RUNGER 2003; JONSON, 1994) e sobre análises em regressões lineares (MONTGOMERY & PECK, 1992) são apresentadas as equações para se obter os coeficientes de regressão; as variâncias destes e o intervalo de confiança, assim como o intervalo de predição da resposta do modelo para uma regressão. As incertezas do modelo e das medições se transformam, através da regressão, em incertezas dos coeficientes de regressão, que são obtidas através das suas variâncias (ISO-GUM, 2003, exemplo de cálculo H3). A dedução para o cálculo das variâncias dos coeficientes e de resposta média, que é a base para o cálculo das incertezas deste método, não é apresentada nessas referências. Todos os cálculos de incerteza recomendados por normas devem ter suas deduções referenciadas, para se documentar como as incertezas são calculadas ou estimadas. HOFFMANN&VIERA (1987) apresentam brevemente os resultados de um cálculo matricial que é utilizado como base para apresentar no apêndice 1, pg. 160 detalhadamente a dedução completa para obter as incertezas obtidas pela regressão linear múltipla.

3.5 Condições de contorno normatizadas para os ensaios *outdoor* do tipo SST e QDT

As condições do ensaio em regime permanente e as do ensaio em regime quase dinâmico são parecidas. Primeiramente são aqui apresentadas aqueles condições de contorno que são iguais nos dois diferentes ensaios baseados nas normas ISO9806 e EN12975, seguida pelas condições específicas do SST (item 3.6, pg. 48) baseadas nas normas ISO9806 e EN12975 e as condições do QDT (item 3.7, pg. 49) baseadas na norma EN12975.

3.5.1 *Considerações sobre o coletor*

- A área A [m²], para a qual a eficiência do coletor seja calculada, é a *área da cobertura transparente*, chamada também *área de abertura* do coletor.
- Não pode ser ensaiado um coletor de área menor, representando um coletor de área maior, pois o comprimento da moldura em relação à área do coletor é maior em pequenas unidades, o que provoca mais perdas térmicas para pequenos coletores.
- O coletor não pode ter falhas na vedação as quais permitem a entrada de umidade do ambiente. A umidade pode prejudicar o isolamento térmico e as características ópticas do coletor, havendo necessidade de verificar a presença desta no coletor. Isto pode ser realizado operando o coletor a baixas temperaturas (aproximadamente 10°C), onde a umidade dentro do coletor é condensada nas aletas do absorvedor do coletor. Na presença de umidade, o coletor deve ser secado, operando-o a 80°C⁶.
- O absorvedor não pode encostar na cobertura do coletor, pois assim prejudicará o seu isolamento térmico. Casos em que estes estão em contato, os pontos são geralmente visíveis pelo lado de fora, através de uma pequena marca gerada pelo contato⁶.

3.5.2 *Instalação da bancada e do coletor*

- O coletor deve ser posicionado de maneira a formar um ângulo de θ inferior

⁶ Não é explicitamente determinada pelas normas, mas é considerável.

que $(\theta_n \pm 30)^\circ$, durante o horário *meio dia solar*, onde $\theta_n = 0^\circ$ é o *ângulo normal* de incidência. Mais especificamente, o fator de $K_{\theta b}(\theta)$, obtido com a equação (150) pg. 218 deve cumprir a condição determinada pela equação que segue.

$$K_{\theta b}(\theta_{\min}) = K_{\theta b}(\theta_n) 0,98 \quad (13)$$

Sem esta condição, a eficiência η_0 seria determinada de forma errada por causa da redução do coeficiente $K_{\theta b}(\theta)$, com ângulos de θ maiores que $(\pm 30)^\circ$ através do aumento da refletância e absortância (figura 27, pg. 219). Esta condição depende do ângulo β do coletor e do ângulo de zênite do sol para ser mantida. Com um cálculo prévio, utilizando as equações do item 5.8.1, pode-se calcular o ângulo θ entre o sol e o coletor durante meio dia para diferentes dias do ano. Assim, é possível verificar se esta condição é mantida.

- A inclinação do coletor em relação ao plano horizontal β é determinada em $(45 \pm 5)^\circ$ pela norma EN12975. A norma ISO 9806 determina no seu item 5.3 que β seja o ângulo da latitude $\beta = (|\phi| \pm 5)^\circ$ para obter as condições de $\theta = (\theta_n \pm 30)^\circ$ determinadas acima e facilitar comparações internacionais de ensaios de coletores. Esta norma especifica o ângulo mínimo de β em 30° para não reduzir consideravelmente os efeitos da convecção natural do ar no coletor. Para permitir ensaios em baixas latitudes (exemplo ilhas canárias com $\phi = 30^\circ$) a especificação de β pela EN12975 é discutida (CEN - AMENDMENT to EN12975-1&2, 2003).
- Somente 5 % do hemisfério do céu visível para o coletor podem ser obstruídos por obstáculos. Prédios ou obstáculos grandes em frente ao coletor devem formar ângulos inferiores que 15° .
- Para evitar incertezas originadas pela reflexão, devem ser evitadas grandes áreas de metal, vidro ou água no campo que seja visível para o coletor.
- No hemisfério do céu que é visível para o coletor não pode haver superfícies com temperaturas elevadas (chaminé, parede exposta ao sol etc.). Estas podem emitir radiação infravermelha que pode ser absorvida pelo coletor e gerar incertezas de medição.

- Deve ser garantido que o ar quente (tipicamente provocado por paredes de prédios orientados para o norte ou por pisos) não interfira no ensaio do coletor. A distância para estas paredes deve ser no mínimo de 2 m e para pisos de 0,5 m.
- O fluido deve escoar no coletor na direção de baixo para cima (entrada no lado inferior do coletor, saída no lado superior), se não houver outra especificação definida pelo fabricante.
- Recomenda-se instalar um ventilador que gere um fluxo de ar artificial em cima do absorvedor do coletor em locais onde a velocidade média do vento é inferior a 3 m/s.

3.5.3 Instalação dos transdutores

- Os transdutores instalados e fixados não devem gerar sombra sobre o coletor solar durante o ensaio.
- Os transdutores de radiação solar devem ser instalados com a mesma orientação de azimute γ e inclinação β em que o coletor é instalado, o desvio máximo deve ser inferior a $\pm 1^\circ$.
- Os transdutores de radiação medem a potência da radiação por efeito de aquecimento de uma cavidade preta em que são montados termopares. Para se ter um equilíbrio térmico necessário para estes transdutores, os cabos devem ser protegidos do aquecimento pela radiação solar e a medição deve ser iniciada somente 30 min depois da instalação.
- O transdutor de radiação global deve ser instalado ao lado do coletor em uma altura média próxima a este.
- Na parte superior do coletor deve ser medida a velocidade do ar em vários pontos a uma distância de 100 mm. Um anemômetro deve ser montado em local onde a velocidade do ar seja a média dos pontos medidos.
- O transdutor de medição para a temperatura ambiente deve ser protegido com uma cobertura ventilada, de cor branca, para evitar o seu aquecimento pela radiação solar. Preferivelmente esta cobertura deve ser ventilada de maneira forçada. A distância máxima do coletor para o transdutor que mede a temperatura ambiente é especificada em 10 m.

- Os transdutores de temperatura no circuito hidráulico devem ser inseridos no circuito de maneira que não permaneça ar em torno do elemento sensor. Portanto estes devem ser inseridos na tubulação de forma que fiquem posicionados com o elemento sensor apontado na direção contrária ao fluxo de água em um tubo vertical.
- Para garantir uma boa mistura do fluido, antes que este escoe em cima do transdutor de temperatura, recomenda-se colocar uma curva de 90° e um dispositivo misturador anterior ao elemento sensor no circuito hidráulico. A distância máxima da ponta do elemento sensor à entrada do tubo no coletor é especificada em 200 mm.

3.5.4 Sistema de medição

- Os instrumentos e transdutores de medição devem ser calibrados no intervalo de um ano, para evitar níveis elevados de incertezas que podem ser originadas por defeitos nestes ou por erros de deriva temporal.
- O intervalo de medição é definido entre (1 e 6) s.

3.5.5 Incertezas e resolução

- A velocidade do fluxo do ar que escoar em cima do coletor deve ser medida com uma incerteza inferior a $\pm 0,5$ m/s para coletores com cobertura, e inferior a $\pm 0,25$ m/s para coletores sem cobertura;
- As temperaturas de entrada T_{in} e de saída T_{out} devem ser medidas com uma incerteza inferior a 0,07 K;
- A temperatura ambiente deve ser medida com uma incerteza inferior a 0,5 K;
- A diferença de $T_{out} - T_{in}$ deve ser medida com uma incerteza inferior a 0,1 K;
- A resolução dos transdutores de temperatura deve ser de 0,02 K. Isto é necessário para se verificar com o sistema se a estabilidade de T_{in} é de $\pm 0,1$ K (a norma recomenda uma resolução de 1/4000 ou de 12 bits = 4096);
- O ângulo do sol deve ser determinado com uma incerteza máxima de $\pm 1^\circ$;
- O tempo deve ser medido com uma incerteza inferior a 0,2%;
- A área do coletor A deve ser medida com uma incerteza inferior a 0,3 %;
- A impedância da entrada da unidade de medição deve ser 1000 vezes superior a impedância do transdutor.

3.5.6 Operação da bancada

- O circuito hidráulico do coletor não deve incluir ar, pois este influencia na transmissão de calor e na medição das temperaturas. Antes de cada ensaio, o ar no circuito deve ser retirado rotineiramente através das válvulas de respiro colocadas nos pontos mais altos deste. A existência de ar e outras impurezas no circuito podem ser verificadas durante o ensaio através de uma janela de observação de fluido integrado no circuito.
- É recomendado que o sistema hidráulico opere continuamente (24 h por dia).
- Diariamente, deve ser ajustado o *anel sombreador* do dispositivo utilizado para a medição da radiação difusa (figura 6) e devem ser limpos o coletor e os e os piranômetros.

3.5.7 Ajuste de pontos de operação

- O fluido deve ser ajustado para a vazão mássica de 0,02 kg/s, caso não tenham sido definidas outras vazões pelo fabricante.
- O fluido deve ser ajustado apenas para uma vazão laminar ou turbulenta. Não devem aparecer vazões na faixa de transição destes dois estados de escoamento (item 5.12.2).
- É muito difícil, através de ajuste manual de uma válvula hidráulica, ajustar a vazão dentro de $\pm 1\%$. Assim, são permitidas variações na vazão entre diferentes dias de até $\pm 5\%$ em relação à vazão média do ensaio.
- A velocidade do escoamento de ar sobre o coletor deve ser ajustada em (3 ± 1) m/s para garantir uma perda térmica constante provocada por convecção externa.
- A temperatura na saída do ventilador radial, que gera um fluxo forçado de ar em cima do coletor, deve variar em relação à temperatura ambiente no máximo em ± 1 K.
- A diferença entre temperatura média do coletor e ambiente $\Delta T = T_m - T_a$ deve ser ajustada para quatro diferentes pontos de operação: 1.) $T_m = (T_a \pm 3)$ K; 2.) $T_m = (T_a + 20)$ K; 3.) $T_m = (T_a + 40)$ K; 4.) $T_m = (T_a + 60)$ K. Como o circuito é operado continuamente, é recomendado que os ajustes sejam feitos

sempre no final do dia. Na operação em $T_m = (T_a + 60)$ K, a temperatura de saída T_{out} deve situar se no mínimo em 80°C.

3.5.8 Determinação das faixas de operação das grandezas medidas do ambiente

- Períodos com balanços negativos da potência térmica \dot{Q}_{me} não devem ser utilizados para a regressão (condição $T_{out} < T_{in}$).
- A diferença de temperatura entre a saída T_{out} do coletor e a sua entrada T_{in} deve ser no mínimo 1 K para evitar que as incertezas sejam grandes em relação à temperatura ($\Delta T = T_m - T_a$) a ser medida, que é utilizada para calcular a potência de perdas térmicas.
- Se as condições do tempo permitirem, a amostra utilizada para a regressão deve apresentar antes e depois do meio dia a mesma quantidade de medições.

3.5.9 Método de regressão

É recomendado utilizar o método dos mínimos quadrados para realizar as regressões do modelo multilinear. Pela facilidade de operação, é aconselhado utilizar um programa de planilha de cálculo (exemplo EXCELTM ou LOTUSTM).

3.6 Ensaios em regime permanente (SST) ISO9806

3.6.1 Condições de contorno para a definição da condição de estabilidade no ensaio SST

Para garantir que o ensaio seja operado em condições de operação de regime permanente, a norma define os seguintes critérios de estabilidade, que são utilizados para selecionar as medições utilizadas para a regressão:

- A radiação solar G pode variar no máximo em ± 50 W/m²;
- A temperatura de entrada T_{in} pode variar no máximo em $\pm 0,1$ K;
- A temperatura ambiente T_a pode variar no máximo em ± 1 K;

- A vazão mássica \dot{m} pode variar no máximo em $\pm 1\%$.

Dentro da média de 15 minutos são formadas varias médias de 30 s. Deve-se utilizar a equação (14) para verificar se uma média de 15 min pode ser aceita para a regressão.

$$\bar{X}_{i,15\text{min}} - C_s \leq \bar{X}_{i,30s} \leq \bar{X}_{i,15\text{min}} + C_s, \quad i = 1 \dots 30 \quad (14)$$

Nesta equação, $\bar{X}_{i,15\text{min}}$ é o valor médio dos 15 minutos da grandeza medida, $\bar{X}_{i,30s}$ é o valor médio de 30 s da grandeza medida e C_s é um dos quatro critérios de seleção descrito acima. Durante o ensaio as variáveis G , T_{in} , T_a , e \dot{m} são medidas simultaneamente. Caso uma das 30 médias de 30 s de uma variável não cumpra a condição especificada pela equação (14), o conjunto de medições realizadas no período de 15 minutos deve ser descartado.

3.6.2 Determinação das faixas de operação das grandezas medidas do ambiente

- A radiação solar deve ser superior a 700 W/m^2 segundo a norma EN12975 (ISO 9806 define 800 W/m^2).
- A radiação difusa deve ser inferior a 30 % da radiação global (a fração difusa F_D deve ser inferior a 0,3).

Para se obter mais dados válidos de medição neste ensaio, as normas permitem que o coletor possa ser rastreado manualmente ou de forma automatizada na orientação do sol. A condição $\theta = \theta_n \pm 30^\circ$ deve ser mantida neste rastreamento.

3.7 Ensaio em regime quase dinâmico (QDT) EN12975

A norma EN12975 permite, desde 1997, que os coletores possam ser ensaiados como opção em regime quase dinâmico em condições *outdoor*, ou em regime permanente em condições *indoor* ou *outdoor*.

3.7.1 Norma para o ensaio em regime quase-dinâmico (QDT) EN12975

Ao contrário do ensaio em regime permanente, em que medições são descartadas pela presença de nuvens que geram variações na radiação solar, no ensaio em regime quase dinâmico estas nuvens são desejadas, pois apresentam as condições adequadas para se obter a capacitância térmica do coletor solar. As nuvens aumentam a fração da radiação difusa definida por $F_D = G_d/G$. Ao contrário do ensaio em regime permanente, em que ($F_D > 0,3$) descarta a medição, no ensaio em regime quase dinâmico a norma EN12975 permite que a fração difusa chegue ao máximo de 50%. A conversão da radiação difusa é interpretada por um modelo específico (equação 152, pg. 220). A norma comenta que a utilização de medições com $F_D = 1,0$ (que corresponde a uma cobertura completa de nuvens) é desejável, porque resulta no aproveitamento de mais medições, mas na referência CEN - AMENDMENT to EN12975-1&2 (2003), é comentado que ainda não existe consenso para se incluir esta condição na norma.

3.7.2 Condições especiais para o regime quase dinâmico

- O coletor deve ser orientado para o norte com o ângulo de azimute de $\gamma = (180 \pm 5)^\circ$.
- É recomendado finalizar o ensaio entre quatro a cinco dias (dependendo das condições climáticas, o ensaio pode demorar mais tempo).
- A medição em todas as faixas de operação do coletor, interpretada pelo modelo multilinear, deve ser garantida, com isto evita-se a extrapolação e um acoplamento dos coeficientes nestas faixas de operação.
- Para acelerar o andamento do ensaio e obter pontos de medição suficientes em cada faixa de medição, a temperatura T_{in} deve ser ajustada no dia anterior ao dia de operação do ensaio, visualizando as seguintes recomendações para duas classificações de dias esperados⁶, pg. 26:
 - Dias em que o céu esteja com poucas nuvens: $T_m = (T_a \pm 3) K$ e $T_m = (T_a + 60) K$ no caso de coletores com altas perdas térmicas;
 - Dias em que o céu esteja parcialmente nublado, inclusive com cobertura de nuvens fechada: $T_m = (T_a \pm 3) K$, $T_m = (T_a + 20) K$, $T_m = (T_a + 40) K$, $T_m = (T_a + 60) K$.

3.7.3 *Determinação das faixas de operação das grandezas medidas do ambiente*

- A radiação solar deve-se situar na faixa de (300 a 1100) W/m².
- Para conseguir eficácia na medição da capacitância térmica do coletor, devem-se ter, em dias parcialmente nublados (com bastante variação da radiação solar), valores de $\Delta T_m / \Delta \tau$ (equação 12, pg. 30), superiores a $\Delta T_m / \Delta \tau = \pm 0,005$ K/s. Caso esta condição não seja alcançada, o ensaio deve prosseguir por mais dias com estas condições de tempo.

3.7.4 *Diagramas para o certificado do ensaio QDT*

Para verificar que não há acoplamento ou extrapolação entre os coeficientes do modelo multilinear, a norma EN12975 recomenda no seu item 6.3.4.6.3, na avaliação dos dados medidos, que as diferentes variáveis medidas sejam representadas somente com pontos em diagramas, e estes devem ser incluídos no certificado do ensaio (Anexo 2, pagina 9 e 10). Os seguintes gráficos devem ser apresentados:

- Radiação direta G_b em função do ângulo da radiação para o dia em que o céu possui poucas nuvens; $T_m = (T_a \pm 3)$ K. Deve-se desenhar esta função para o período antes do meio dia e separadamente depois do meio dia, com pontilhados diferentes. Com este gráfico, podem-se examinar se existem medições de G_b para todos os ângulos de θ . Assim, é possível verificar se há desacoplamento dos submodelos que determinam a característica de resposta $K_{\theta b} G_b$ dos outros submodelos.
- Radiação direta G_b em função da radiação global G , para a condição dos dias com $T_m = (T_a \pm 3)$ K. Este gráfico é utilizado para examinar a existência de pontos de medição suficientes com radiação difusa baixa (com céu limpo) e alta (com céu coberto) para verificar o desacoplamento entre o submodelo da radiação direta e o da radiação difusa (Anexo 2, figura B2).
- $\Delta T = T_m - T_a$ em função da radiação global G para as condições $T_m = (T_a \pm 3)$ K, $T_m = (T_a + 20)$ K; $T_m = (T_a + 40)$ K; $T_m = (T_a + 60)$ K. Esta condição é

utilizada para se examinar que em todas as três temperaturas de operação aparecem radiações na faixa de (300 a 1100) W/m², com que é verificado o desacoplamento dos coeficientes que determinam as perdas térmicas dos outros coeficientes. Da mesma forma, é garantido que para o modelo polinomial (equação 11, pg. 35) não haja incertezas provocadas pela extrapolação. Observação: este caso pode aparecer quando há poucos pontos de medição em uma faixa de medição (exemplo: na operação com altas temperaturas de ΔT).

- A velocidade do vento deve ser traçada em função da radiação G , para examinar se o vento tem uma distribuição uniforme em função da radiação solar.
- As médias das medições T_{in} , T_{out} , T_a , \dot{m} , G e G_b utilizadas para a regressão devem ser traçadas, para o ensaio completo do coletor, em função do tempo.
- A potência térmica medida \dot{Q}_{me} deve ser traçada junto com a calculada \dot{Q}_{mo} (utilizando o modelo do coletor) em função do tempo (figura 10, pg. 89).

A norma ainda recomenda que se realize uma regressão depois de cada dia de medição e se trace, com os dados obtidos, a potência térmica medida \dot{Q}_{me} e a estimada \dot{Q}_{mo} em função do tempo. Outra recomendação é de fazer esta comparação *online*, no computador que opera o sistema de medição, para melhor verificar o aperfeiçoamento do modelo.

A curva padronizada de eficiência (figura 3, pg. 35) deve ser traçada, aplicando os coeficientes do coletor, obtidos através da regressão para a equação (12), pg. 36. Para isto, deve ser utilizada uma radiação direta $G_b = 680$ W/m², uma radiação difusa G_d de 120 W/m² e um ângulo θ de 15°. A norma considera que estas são as condições médias que aparecem em ensaios em regime permanente e assim é possível comparar os resultados de um ensaio em regime permanente com um em regime quase dinâmico.

3.7.5 Componente do modelo quase dinâmico que determina o calor específico do coletor levando em conta o volume de água que ele contém

Com o componente dinâmico do coletor, (equação (12), pg. 36 - submodelo a_6X_6 e equação (128), pg. 209) do modelo QDT é possível interpretar variações na saída do coletor provocadas pela variação da radiação solar.

A temperatura média do coletor T_m varia com a variação da radiação solar G , incluindo o atraso provocado através do calor específico do coletor e do volume de água que cabe no seu absorvedor. Depois que o absorvedor do coletor e a água nas tubulações são aquecidos e transportados para a saída, um aumento ou redução da temperatura, provocado pela variação da radiação solar, também é perceptível na saída do coletor. A temperatura média do absorvedor no instante τ_i é calculada com a equação (6) pg. 31. O intervalo entre duas medições $\Delta\tau$, determinado pela norma, é de (1 a 6) s. Para o sistema utilizado, foi adotado o valor de 6 s por limitação da velocidade do sistema de medição.

A norma especifica que a derivada do tempo da temperatura média seja realizada pela equação que segue

$$\frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\Delta T_m}{\Delta \tau} = \frac{T_{m,i} - T_{m,i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}} \quad (15)$$

onde $T_{m,i}$ é a temperatura média do coletor no instante τ_i , $T_{m,i-1}$ é a temperatura média do coletor no instante τ_{i-1} e onde o intervalo $\Delta\tau$ entre τ_i e τ_{i-1} é o intervalo de medição. Com esta equação é formada a derivada $\partial T_m / \partial \tau$ das medições de T_m , com a qual é possível realizar um balanço de energias, sendo a energia que é gerada através da variação da temperatura média do coletor calculada pela equação (128), pg. 209.

A norma EN12975 especifica que para a regressão, com que são determinados os coeficientes do coletor, deve-se formar a média de (5 a 10) min das medições. Nos ensaios realizados foram escolhidos 50 valores de medição no intervalo de 6 s para formar a média que corresponde a 5 min. Com a média dos 50 valores de $(\Delta T_m / \Delta t)$, que equivale X_6 na equação (12), pg. 36, é calculada a média da potência térmica

\dot{Q}_{Cm} (equação 16) para os 5 minutos, onde $i = (1 \text{ a } n)$ é o número de valores utilizados para formar esta média.

$$\dot{Q}_{Cm} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{C,i}}{n} = \overset{a6}{k_3} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\overset{x6}{(dT_{m,i})}}{d\tau} = \overset{a6}{k_3} \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{\overset{x6}{(dT_{m,i})}}{6s} \quad (16)$$

Valores positivos e negativos de \dot{Q}_{Cm} que são produzidos pela troca de sinal de ΔT_m , aparecem durante a operação do ensaio. Com a utilização da equação (16), potências térmicas negativas e positivas de \dot{Q}_{Cm} se anulam dentro da média de 5 min, quando as somas dessas potências estiverem iguais.

3.7.6 Modelo da radiação refletida de obstáculos na frente do coletor

DUFFIE & BECKMANN (1991) ainda completam este modelo com o submodelo para a radiação refletida como é descrita no apêndice 5, item 2.12, pg. 221. A norma EN12975 reduz a influência da radiação refletida com a especificação do item 3.5.2, parágrafos 3 e 4, pg. 43. Pelo modelo utilizado para a regressão (equação (12), pg. 36) a radiação refletida é interpretada como radiação difusa, que é medida pelos piranômetros da radiação global e da radiação difusa. Pela subtração $G - G_d$ a radiação refletida não aparece como influência no cálculo da radiação direta.

3.7.7 Influência do vento e da radiação de onda longa (infravermelho) do céu no coletor

Coletores utilizados para aquecimento de água para o uso doméstico, cobertos por um material transparente com isolamento térmico e estrutura externa de suporte como apresentado em figura 1, geralmente não são sensíveis às variações do vento e à radiação de onda longa do céu. A norma EN12975 permite que os três submodelos (equações (18) e (19), pg. 55), que corrigem a influência do vento e o efeito da radiação de onda longa, não necessitem ser incluídos na regressão para a avaliação do ensaio. Para excluir efeitos de vento, a norma EN12975 especifica um vento constante de (3 ± 1) m/s para o ensaio com coletores fechados (figura 1).

Porém, determina ainda que, para a rejeição de um dos três submodelos, a relação da equação (17) deva ser cumprida, onde a_j é o coeficiente de regressão deste submodelo e $\sigma(a_j)$ é o desvio padrão deste coeficiente, obtido pela regressão.

$$a_j / \sigma(a_j) < 2,0 \Rightarrow \text{rejeição do submodelo} \quad (17)$$

O modelo para o vento é definido pela equação (18), em que v_w é a velocidade do vento escoando em cima do coletor, T_m é a temperatura média do coletor (equação (2), pg. 30), T_a é a temperatura ambiente, G é a radiação solar global medida no plano inclinado do coletor e c_1 e c_2 são os coeficientes que determinam as perdas do coletor provocados pelo vento.

$$\dot{Q}_W = \overbrace{c_1}^{a7} v_w \overbrace{(T_m - T_a)}^{X7} + \overbrace{c_2}^{a8} \overbrace{v G}^{X8} \quad (18)$$

O modelo do coletor que inclui a radiação de onda longa é definido pela norma com equação que segue

$$\dot{Q}_{LW} = \overbrace{c_3}^{a9} \overbrace{\sigma(T_{sky}^4 - T_{rad}^4)}^{X9} = \overbrace{c_3}^{a9} \overbrace{(E_L - \sigma T_{rad}^4)}^{X9} \quad (19)$$

onde σ é a constante de Stefan Boltzmann com $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$, T_{rad} é a temperatura da fonte de radiação (MEIR et.al, 2002), que é a temperatura da cobertura do coletor e $E_L[\text{W}/\text{m}^2]$ é a radiação de onda longa emitida pelo céu, que é medida com um transdutor para a medição da radiação de onda longa, denominado *pirgeômetro*. A norma comenta que o valor \dot{Q}_{LW} da equação (19) é negativo, na casa de $-100 \text{ W}/\text{m}^2$ para uma temperatura ambiente de $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ e com o céu sem nuvens, tendo assim, uma temperatura equivalente de corpo negro de $T_{sky} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

As variáveis X_7 , X_8 e X_9 são utilizadas para a regressão linear múltipla e a_6 , a_7 e a_8 são os coeficientes obtidos pela regressão caso estes modelos sejam incluídos na regressão ⁷.

3.7.8 Considerações finais na aplicação dos resultados do ensaio QDT

O objetivo principal do ensaio em regime quase dinâmico é a redução do custo de ensaio, através de um processo mais rápido e utilizando menos instrumentação. Porém, tem outra vantagem, a de oferecer a interpretação da característica do coletor com mais detalhes, o que resulta em menores incertezas na previsão da energia, utilizando dados climáticos da aplicação de coletores (TMY). As seguintes considerações devem ser feitas a respeito da capacitância térmica do coletor:

- **Sistema de controle de circulação**

Em alguns sistemas é preciso simular as características dinâmicas de um coletor. Isto pode ser útil, por exemplo, para verificar se um sistema de controle de circulação de fluido é habilitado para trabalhar com coletores que tenham capacitâncias térmicas específicas.

- **Estimação da energia anual do coletor**

Com os coeficientes obtidos através do ensaio do coletor, são realizadas simulações de desempenho. Estas simulações são normalmente feitas no programa TRANSYS⁸, que utiliza médias horárias da radiação solar global e da temperatura ambiente. Para determinar as energias horárias, convertidas durante um ano típico de radiação solar e temperatura ambiente (TMY), o componente que determina a capacitância térmica do coletor não é significativo, pois toda a energia absorvida pelo calor específico do coletor é logo devolvida para o circuito de aquecimento. Assim, ao se utilizar as médias horárias, essas energias se anulam.

⁷ Isto é geralmente o caso quando são ensaiados coletores sem cobertura, utilizados para o aquecimento de piscinas

⁸ A transient system simulation programm, Solar energy laboratory, University of Wisconsin – Madison 1996 - USA

- **Avaliação das capacitâncias térmicas do coletor**

Para se obter o valor da capacitância térmica do coletor, deve-se normalizar o calor específico da água c_p [J/(kg K)] em [J/(m² K)], considerando o volume (peso) da água que cada m² de área de coletor contém. Em um cálculo simples, subtraí-se o resultado do valor de k_3 que corresponde ao coeficiente a_6 (equação 12, pg. 36] obtido pela regressão (item 6.3), para obter o valor da capacitância térmica do coletor [J/(m² K)]. As capacitâncias térmicas da cobertura e do isolamento também participam da capacitância térmica total, mas como estes não estão em contato direto com a água ou com o absorvedor, a norma EN12975 determina no seu item 6.1.6.2 fatores de peso com os quais a capacitância térmica desses componentes seja proporcionalmente reduzida para ser depois adicionada à capacitância da água e do absorvedor.

3.8 Métodos de avaliação dos ensaios

3.8.1 Métodos para calcular incertezas em ensaios de regime permanente com o método ponderado de regressão

MATHIOULAKIS et al. (1999), MÜLLER-SCHÖLL & FREI (2000) e SABATELLI (2002) elaboraram uma estratégia para calcular as incertezas da curva padrão de eficiência de coletores em ensaios de regime permanente, utilizando um método ponderado de regressão. Enquanto MATHIOULAKIS et al. (1999) consideraram as variáveis independentes e parcialmente dependentes dos coeficientes, utilizando o modelo térmico simplificado como representado pela equação (7), pg. 32, MÜLLER-SCHÖLL & FREI (2000) considerou as variáveis somente independentes, porém utilizou o modelo térmico do coletor solar mais representativo (equação 9, pg. 33). A norma ISO9806 refere-se a este modelo. As incertezas foram elaboradas levando-se em consideração o cálculo de incertezas apresentado pelo guia (ISO-GUM, 2003, item 5.2). KRATZENBERG et al. (2004) determinaram os resultados da incerteza de regressão múltipla ponderada, para o ensaio em regime quase dinâmico e comparou estes com a regressão múltipla de mínimos quadrados. As incertezas foram elaboradas levando-se em consideração o cálculo de incerteza para variáveis independentes apresentado pelo guia ISO-GUM (2003) no seu item 5.2.

3.8.2 Métodos para a predição da produção anual de um coletor solar

WHILLIER (1977) elaborou um primeiro método para a predição de desempenho de coletores solares. A norma ISO9806 descreve como aplicar os resultados do ensaio para a estimação da energia anual em que a curva de eficiência é casada com um ano padrão climático (TMY) e uma curva de consumo de água quente padrão, representando o consumo típico do usuário.

3.8.3 Métodos de estimação da incerteza da produção anual

Apesar de que um cálculo de incertezas relacionado aos resultados do ensaio é altamente desejado (CEN-SOLAR KEYMARK INTERIM REPORT, 2002), atualmente os resultados dos ensaios de coletores não incluem esta opção, tanto na norma ISO 9806 como na norma EN12975. KRATZENBERG et al.(2003) apresentaram um cálculo das incertezas aplicado para o cálculo da energia anual, mas elaborou as incertezas somente em função da temperatura média do coletor.

3.8.4 Métodos de classificação de coletores

No mercado brasileiro os coletores solares de melhor empenho ganham um selo de economia com classificações de A a G, como é apresentado por PEREIRA et al. (2004). Apesar de a classificação ser justificada, para o cálculo desta é utilizado somente um único ponto na curva de eficiência. A vantagem que o coletor tem, utilizando um bom isolamento, não é expressa com esta aproximação pelo fato de que este ponto de operação representa principalmente temperaturas ΔT baixas de operação do coletor na faixa de sua aplicação. Melhorias nesta classificação são atingíveis utilizando-se o item 3.8.2 como base para esta classificação. Como o Brasil é subdividido em regiões climáticas com características de radiação solar e temperatura ambiente distintas, será obtida assim, para cada região climática, uma classificação específica para um coletor (verifique também a tabela *calculation results, page 7– Anexo 2*).

3.8.5 Comparação dos resultados e das incertezas do ensaio em regime permanente com os do ensaio em regime quase dinâmico

Os resultados dos ensaios de coletores são os coeficientes e as incertezas destes, com os quais pode ser traçada a curva padronizada de eficiência do coletor (figura 3, pg. 35).

FISCHER (2004) comparou os dois diferentes ensaios e conseguiu uma boa superposição das curvas padronizadas de eficiência sem levar em consideração as incertezas dos resultados. Nesta comparação (de nove diferentes coletores), um dos ensaios QDT resultou na curva de eficiência com valores de $\eta = (0,002 \text{ a } 0,012)$ superiores em relação ao SST. O coeficiente de η_0 teve variações inferiores a $\pm 0,011$ nas nove comparações SST com QDT.

3.8.6 Validação dos resultados do ensaio em regime quase dinâmico

FISCHER & MÜLLER-STEINHAGEN (2004) apresentam um método de validação de ensaio QDT, utilizando medições adicionais que validam os resultados deste ensaio, impondo limites de erros empiricamente determinados (item 6.12).

3.8.7 Validação por estabilidade estatística dos resultados dos ensaios

Na literatura sobre estatística aplicada em engenharia (MONTGOMERY & RUNGER, 2004 e JONSON, 1994), é documentado o teste estatístico para verificar se um coeficiente de regressão seja diferente de zero para excluir um submodelo de um modelo multilinear que é comparável com o método para verificar se um coeficiente de regressão tem significância em uma regressão apresentado pela norma EN12975 (equação 17, página 55). CLOGG (1995) documenta que é interessante, além deste teste, saber se os coeficientes de uma regressão são estatisticamente modificados quando se inclui um submodelo para regressão ou também quando se utiliza um conjunto de outros dados na realização da mesma regressão. KRATZENBERG et al. (2005) compararam os coeficientes do SST e do QDT estatisticamente, utilizando as incertezas destes dois ensaios e não obtiveram semelhança estatística dos coeficientes ao utilizar o mesmo coletor. Por outro lado, descobriram que os coeficientes de vários ensaios quase dinâmicos, são estatisticamente semelhantes

ao utilizar o mesmo coletor, provando assim a estabilidade estatística dos coeficientes do modelo quase dinâmico.

3.8.8 Métodos de validação dos resultados de uma regressão multilinear

Nos livros de MONTGOMERY & PECK (1992), JONSON (1994) e MONTGOMERY & RUNGER (2003), são apresentadas várias avaliações que podem ser utilizadas para verificar se os erros do modelo têm distribuição normal. Testes de resíduos, para saber se os resíduos são de forma Heteroscedastico⁹ ou Homoscedastico¹⁰, são apresentados por GUJARATI (2000).

⁹ Heteroscedasticidade: é considerado que com o aumento da variável de X_i na sua faixa de medição ocorra o aumento ou a redução da variância condicional de $(\hat{Y} - Y)^2$ ou $(\dot{Q}_{mo} - \dot{Q}_{me})^2$ (verifique referência GUJARATI (2000)).

¹⁰ Homoscedasticidade: é considerado que com o aumento da variável de X_i na sua faixa de medição não ocorra o aumento ou a redução da variância condicional de $(\hat{Y} - Y)^2$ ou $(\dot{Q}_{mo} - \dot{Q}_{me})^2$ (verifique referência GUJARATI (2000)).

4 CONFIGURAÇÃO DA BANCADA PARA OS ENSAIOS DE COLETORES

A bancada foi construída seguindo as exigências das normas EN12975 e ISO9806 para ensaios de coletores tanto em regime permanente como em regime quase dinâmico em condições *outdoor*.

4.1 Estrutura mecânica

Foi implementada uma bancada (figura 4) a partir da qual se pode medir a potência solar que o coletor converte, assim como os parâmetros do ambiente e de operação do coletor (item 5, pg. **Erro! Indicador não definido.**).

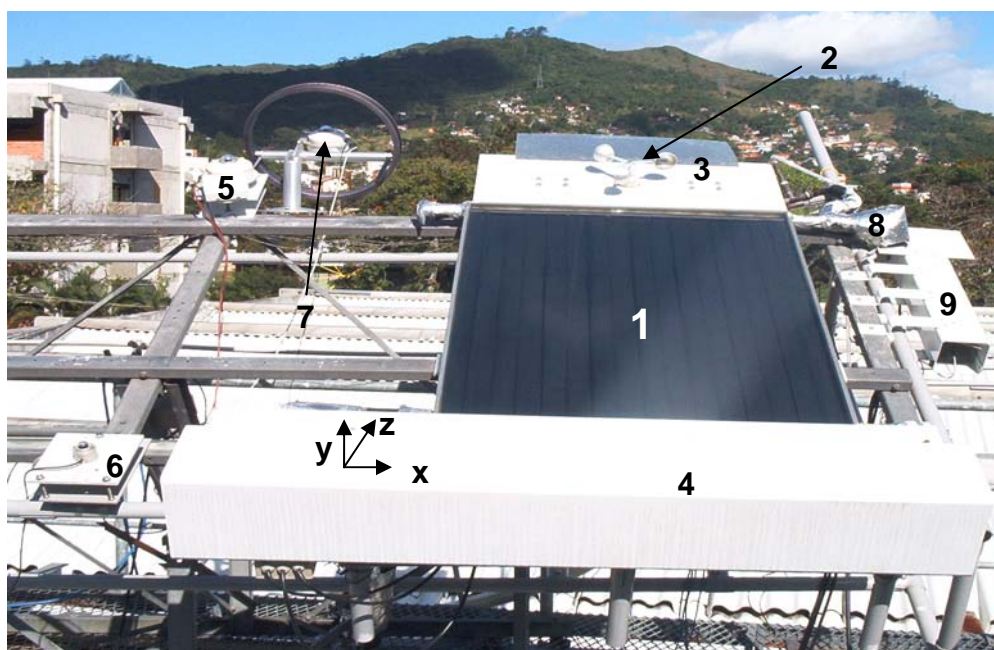


Figura 4 – Bancada de ensaios de coletores – legenda: coletor solar (1); anemômetro (2); chapa de proteção de vento (3); Ventilador radial (4); transdutor de medição da potência da radiação solar global; piranômetro (5)+(6); transdutor de medição da potência da radiação solar difusa; piranômetro com o dispositivo *anel sombreador* (7); transdutor para medição da temperatura de saída do coletor (8); transdutor para medir a temperatura ambiente (9)

A bancada inclui as seguintes possibilidades de ajuste:

- Ângulo de inclinação do coletor β ;
- Ventilador e anemômetro na orientação dos eixos x, y e z (figura 4).

Com estes ajustes podem ser ensaiados coletores de vários comprimentos e alturas. É apenas necessário elevar o ventilador e o anemômetro caso seja ensaiado um coletor com maior altura (ou espessura) e afastar o anemômetro caso seja ensaiado um coletor mais comprido. Observação: O ângulo β não precisa ser ajustado. Com $\beta = 27,5^\circ$ (ângulo da latitude) obtêm-se mínimos ângulos de θ de $23,45^\circ$ para os meses de dezembro e junho e de 0° para os meses de setembro e março em Florianópolis (tabela 1, pg. 74).

4.2 Sistema e circuito hidráulico

O sistema hidráulico (figura 5) consiste nos seguintes componentes:

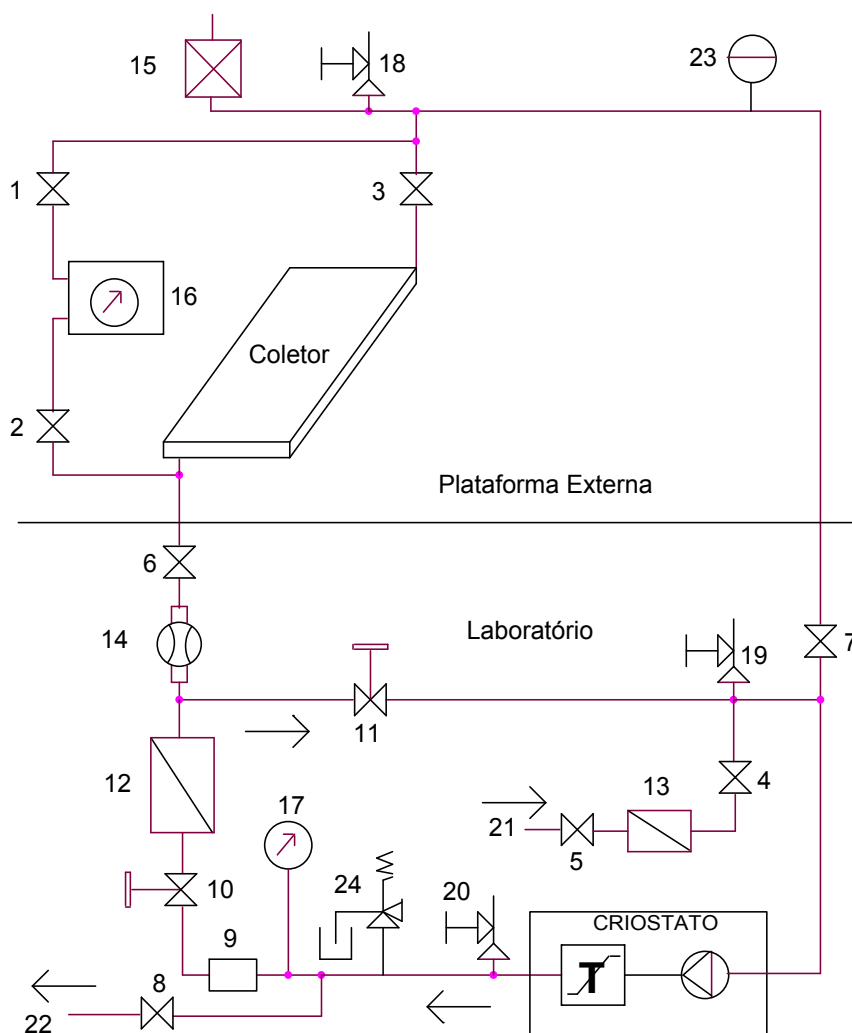


Figura 5 – Sistema hidráulico da bancada – legenda: válvulas gaveta (1) a (5); válvula de globo (6) a (8); observador do fluido (9); válvula de ajuste tipo agulha (10) e (11); filtro 200µm (12); filtro de entrada (13); medidor de vazão (14); respirador automático (15); medidor de pressão diferencial (16); manômetro (17); válvulas de respirador manual (18) a (20); alimentação de água (21) esvaziamento de água (22); vaso de expansão (23) e válvula de alívio de pressão (24)

- **Criostato**

O criostato contém uma unidade de aquecimento e uma de refrigeração. Ambos são controlados através de um controlador do tipo PID. O criostato tem um reservatório em que a temperatura do fluido é mantida constante através do controlador PID e uma bomba que homogeneiza a água dentro deste reservatório. Quando esta alimenta um circuito externo, o criostato pode alimentar um circuito qualquer com um fluido em que estão estabilizadas a temperatura e a vazão. O criostato utilizado tem a seguinte especificação: Fabricante: Lauda; Modelo RUK 40; potência de aquecimento: 2 kW; potência de resfriamento 4,8 kW; pressão manométrica da bomba 0,8 bar; capacidade do banho; (19 a 27) litros; faixa de operação (-40 a +100) °C.

- **Válvula de alívio de pressão**

Essa é uma válvula de segurança que alivia o circuito da pressão alta, caso a pressão do sistema apresentar uma sobre-pressão (acima de 5,0 bar). A pressão de atuação da válvula utilizada é ajustável.

- **Manômetro**

Este instrumento mostra a pressão manométrica dentro do circuito hidráulico e é um instrumento de medição utilizado para verificar visualmente, pelo operador, a pressão dentro do circuito hidráulico durante o ensaio.

- **Filtro de água**

O filtro tem a responsabilidade de manter a água limpa dentro do circuito hidráulico fechado. O filtro utilizado tem as seguintes especificações técnicas:

Material do filtro: A304; Pressão máximo de operação: 2 060 kN/m²; Pressão de teste: 2 257 kN/m²; Temperatura do projeto: 120°C; massa vazia: 4,3 kg¹¹.

- **Filtro de entrada**

O filtro de entrada retém impurezas da rede pública de água.

¹¹ Pelo fabricante especificado em kgf/cm² (atü) onde 1 kgf/cm² = 98,135 kN/m² (kPa)

- **Válvula de regulação de vazão tipo agulha**

Essa válvula é um componente com o qual se pode ajustar a vazão, igual a um registro de chuveiro, porém ela necessita de mais giros (ou voltas de manopla) para fechar ou abrir um circuito. Para o ajuste fino, sem interferência da histerese de atuação, inerente às válvulas, uma delas é colocada na alimentação do coletor, e somente é aberta para aumentar a vazão. A outra é colocada no *bypass*, e também somente é aberta para reduzir a vazão.

- **Observador do fluido**

O observador é constituído por um tubo de vidro transparente, que tem a função de observar a presença de bolhas de ar ou sujeira, que poderiam gerar oscilações na vazão e erros na medição da vazão.

- **Válvula de globo de duas vias**

Esta válvula é constituída por uma esfera com furo, que tem a vantagem de ser rapidamente fechada ou aberta, girando a alavanca desta válvula apenas em 90°. Esta válvula é utilizada para evitar que o retorno do fluxo de água (na hora de desligar o sistema) provoque o transbordamento do reservatório de água no criostato, pois o coletor está instalado no telhado do laboratório aproximadamente 6 m acima do criostato.

- **Válvulas de respiro automáticas e manuais**

Estas válvulas têm a função de tirar o ar do circuito hidráulico. As válvulas de respiro automáticas são instaladas nos pontos mais altos do circuito (onde pode acontecer a formação de bolhas de ar) e são acompanhadas de válvulas de respiro operáveis manualmente. O funcionamento das válvulas automáticas é periodicamente verificado com a atuação das válvulas manuais.

- **Dutos de alimentação para o coletor**

Em função do espaço disponível no laboratório, o coletor e o criostato permanecem distantes aproximadamente 20 m. A diferença de altura entre ambos os elementos é de aproximadamente 5 m, sendo o criostato posicionado no laboratório e o coletor no teto deste, na plataforma do LABSOLAR, no bloco B da Engenharia Mecânica.

Segundo a norma ISO9806, a temperatura de entrada do coletor deve ser mantida estável em ± 0.1 K. Os dutos de entrada do coletor, que podem ter temperaturas de até 95°C , são expostos a condições de temperaturas variáveis, que podem ser provocadas tanto pelo ar-condicionado como por variações naturais da temperatura ambiente. Estas variações podem comprometer a estabilidade da temperatura do fluido na entrada do coletor. Foi utilizada para o isolamento térmico uma camada com espessura de 3 cm de polipropileno expandido (ARMAFLEXTM) para os dutos que passam pelo laboratório e de 12 cm na seção do duto que é exposto às condições ambientais. Os dutos foram revestidos com um material refletivo para evitar influências decorrentes do aquecimento pela radiação solar.

- **Absorvedor do coletor solar**

Verifique a descrição do coletor solar no item 2.1.

- **Transdutores de temperatura**

Verifique a descrição destes transdutores no item 5.9.

- **Alimentação de água**

É a ligação para a rede de alimentação de água e é utilizada para a complementação e reposição da água dentro do circuito durante as manutenções. Depois de cada troca, é medida a resistência elétrica da água, pois no manual do transdutor magnético indutivo, que mede a vazão do circuito, a resistência máxima do fluido é especificada com $200\text{ k}\Omega/\text{cm}$. A água na rede da UFSC tem aproximadamente (65 a 68) $\text{k}\Omega/\text{cm}$ de condutividade elétrica (medido na distância dos eletrodos do medidor de vazão de 6 mm com o multímetro Minipa ET 2700 na faixa de medição de $200\text{ k}\Omega$)¹².

- **Esvaziamento da água**

Na troca do coletor a ser ensaiado ou depois de 3 semanas de operação, deve-se esvaziar o circuito e trocar a água. Observação: A água dentro do circuito do ensaio

¹² No manual do medidor de vazão denominado $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microsiemens / centímetro) de condutividade onde $1\ \mu\text{S}/\text{cm}$ corresponde a $1\ \text{M}\Omega/\text{cm}$ entre dois eletrodos mergulhados no fluido que passa pelo transdutor

cria a formação de limo depois de aproximadamente 3 semanas. Este limo entope o filtro do circuito, o que provoca uma redução da vazão não desprezível durante a operação do ensaio, é ocorreu especialmente em temperaturas de operação de $T_m = (T_a \pm 3) \text{ K}$.

- **Medidor de pressão diferencial**

As normas ISO9806 e EN12975 determinam a medição da curva de perda de carga do coletor em função da vazão. Depois do ensaio para obter a eficiência do coletor, o circuito hidráulico é utilizado para medir a curva de perda de carga deste com um medidor de pressão diferencial.

4.2.1 Pressão da água no circuito hidráulico

Por causa da limitação da instrumentação nos ensaios realizados, a pressão da água que passava no circuito era no máximo de 0,5 bar, que corresponde a diferença de altura da coluna de água entre o criostato e o coletor (~5000 mm H₂O). As normas não definem a pressão da água no circuito hidráulico. Portanto, é desejável ter uma pressão aproximada à pressão máxima de operação com que os coletores serão utilizados (~4 bar). Com isso, já se realiza durante o ensaio de eficiência um teste de resistência às temperaturas e pressões de operação de um sistema solar. Outra vantagem de pressões maiores é que efeitos de cavitação na bomba (figura 4, pg. 62 - criostato), que acontecem com pressões baixas, podem ser reduzidos.

- **Transdutor de vazão do tipo magnético indutivo**
- **Transdutor de temperatura para medir a temperatura do fluido passando pelo transdutor de vazão**
- **Transdutor de temperatura para medir a temperatura de entrada e de saída do coletor**

Verifique a descrição destes transdutores no item 5.9.

5 UNIDADE DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADA E TRANSDUTORES

Foi utilizado como unidade de medição o *datalogger HP 34970A*. Este instrumento permite medir tensões, correntes, resistências, frequências e leitura direta de termopares. O multiplexador deste *datalogger* é do tipo relé com contatos dourados. Com a unidade de medição, são medidas durante um ensaio de coletores as seguintes grandezas:

- Radiação solar global G , na faixa de (0 a 1400) W/m^2 ;
- Radiação solar global G , na faixa de (0 a 1400) W/m^2 para verificar o sombreamento do coletor;
- Radiação difusa G_d , na faixa de (0 a 800) W/m^2 ;
- Temperatura de entrada T_{in} , na faixa de (10 a 100) $^{\circ}C$;
- Temperatura de saída T_{out} na faixa de (10 a 100) $^{\circ}C$;
- Temperatura ambiente T_a na faixa de (10 a 50) $^{\circ}C$;
- Velocidade do ar que flua em cima da abertura do coletor V na faixa de (1 a 6) m/s ;
- Vazão do fluido no absorvedor do coletor na faixa de (0 a 200) l/h .

5.1 Especificação da unidade de medição

Fabricante: HP – Agilent

Modelo: 34970 A

Resistência de entrada para medições de tensão CC: $10\ G\Omega$

Nível de ruído: 0,001 % da faixa de medição para medições de tensão e corrente do tipo CC, e de resistência.

Resolução: $6^{1/2}$ dígitos (corresponde a 0,0001 %).

Função *autozero*:

Na função *autozero* é medida continuamente a referência de 0 V (GND) intercalada às medições. Diferenças para 0 V dessa medição são utilizadas para corrigir

variações no offset da unidade de medição. A função *autozero* não é ajustável através do LABVIEW e é configurada como *default 34970 A*, que é programado na memória não volátil do instrumento (AGILENT- *USERS GUIDE* , 1997). Para baixos intervalos de medição (a partir de 1/50 s), a função *autozero* é automaticamente desabilitada. Erro máximo na utilização sem a função *autozero*: $\pm 0,0002\%$ da faixa de medição + 5 μV . Verifique mais especificações deste instrumento no Anexo1.

O cabo utilizado para ligar os transdutores ao sistema de medição tem a seguinte especificação: 4 pares AWG 22; resistência = 8 Ω / 100 m; blindado e trançado de dois a dois fios.

5.2 Ligação e medição com as termorresistências

Foram realizadas medições de temperatura: Na entrada e na saída do coletor, do ambiente e do fluido passando pelo transdutor de vazão; essas medições foram realizadas com termorresistências do tipo Pt100. A faixa de medição utilizada é de (0 a 1000) Ω . O *datalogger* mede as resistências utilizando a *medição por quatro fios*. Por dois fios os elementos Pt100 são alimentados com uma corrente constante de 1 mA e pelos outros dois é realizada a leitura da tensão nestes. Com uma resistência muito alta de 10 $M\Omega$ na entrada do amplificador do *datalogger*, a queda de tensão nos fios de leitura de tensão é somente de 0,32 μV , que equivale a 0,0008 K (balanço de incertezas no apêndice 4, pg. 180). Os contatos de relés utilizados na unidade de multiplexação (item 5.5) são dourados e de alta homogeneidade de liga de material. Mesmo assim, durante o uso, esta característica pode se modificar e gerar tensões elétricas residuais através do efeito termopar.

O sistema de medição pode automaticamente comparar erros gerados através destas tensões, que podem aparecer nos contatos dos relés ou nas outras ligações. Para isto, ele mede primeiro a tensão da termorresistência, sendo ela alimentada por uma corrente fixa, e depois a tensão da mesma sem que ela seja alimentada por uma corrente. A tensão residual que o *datalogger* mede na segunda vez (sendo esta positiva ou negativa) é subtraída automaticamente da primeira medição de tensão, se o *datalogger* for programado para operar neste modo de compensação. Esse

modo de operação pode ser ajustado no LABVIEW™ e foi escolhido por não ser possível obter uma placa multiplexadora nova para os ensaios.

5.3 Medição das tensões

- Piranômetros geram uma tensão provocado pelo efeito termopar (ligando vários termopares em série) na faixa de (0 a 12) mV. Foi escolhida a faixa de (0 a 100) mV na unidade de medição. Nesta faixa, a entrada desta unidade tem uma resistência interna de 10 M Ω .
- O medidor de vazão gera uma corrente de (4 a 20) mA, que é proporcional à vazão volumétrica do fluido. Esta corrente alimenta uma resistência de precisão (especificação da resistência no Anexo 1), sobre a qual é medida a queda de tensão que esta corrente produz.

5.4 Medição das freqüências

O anemômetro emite um sinal com freqüência na faixa de (0 a 110) Hz para velocidades do vento entre (0,3 a 6) m/s. Para medir esta freqüência, foi escolhida a função *autorange* no sistema de medição, onde se encontra uma faixa de medição de freqüência de 3 Hz a 300 khz.

5.5 Unidade de multiplexação

Esta função na unidade de medição (*data logger*) é realizada com relés, garantindo assim um alto isolamento elétrico entre os canais. Os relés têm a desvantagem de ter uma vida útil de (10^5 a 10^6) ciclos de chaveamento, onde a resistência de contato deve ficar abaixo de 1 Ω (o fabricante especifica essa resistência de aproximadamente de 0,5 Ω com 10^6 ciclos) verifique AGILENT- *USERS GUIDE* (1997). Porém, a placa multiplexadora onde os relés são montados tem a vantagem de ser substituível (em um *slot* do *data logger*), garantindo assim a reposição do multiplexador. Especificação: Fabricante: Agilent; multiplexador do tipo relé *reed*, Modelo: 34902A.

5.6 Computador

Para a aquisição dos dados, foi utilizado um computador com a seguinte especificação: Pentium III, 500 MHz, 130 Kbyte RAM

5.7 Controle remoto do sistema

Com a utilização do programa *VNC-viewer™* foi possível operar a bancada remotamente através do internet, o que possibilita realizar os ensaios inclusive durante os finais de semana.

5.8 Software de medição

Foi elaborado um programa em LABVIEW™ utilizado para a aquisição dos dados durante os ensaios. O programa, que gerencia a medição automática durante os ensaios, foi desenvolvido por um aluno do curso de engenharia da Escola de Ciência Aplicada em Magdeburg, Alemanha (PETZOLD 2005), sob a orientação do autor do presente trabalho. Este programa realiza as seguintes sub-tarefas que são executadas de 6 em 6 segundos:

- Leitura das tensões, das resistências e das freqüências dos transdutores;
- Correção do *offset* e do fator de amplificação dos amplificadores;
- Transformação das tensões lidas nos valores das grandezas de medição;
- Correção do erro de medição provocado pelo *anel sombreador* no transdutor de radiação difusa;
- Cálculo da posição do sol (ângulos de elevação e de azimute) na esfera do céu;
- Cálculo do ângulo θ entre o sol e o coletor;
- Cálculo da potência térmica medida que o coletor produz;
- Cálculo da potência térmica do modelo do coletor (utilizando os coeficientes de uma regressão anterior);
- Cálculo da eficiência medida que o coletor produz;
- Cálculo da eficiência do modelo do coletor (utilizando os coeficientes de uma regressão anterior);

- Criação de um painel onde todos os valores mais importantes serão mostrados durante a medição;
- Formação do valor médio de 5 minutos do erro da eficiência e da potência térmica, que são as diferenças entre eficiência estimada pelo modelo η_{mo} e eficiência medida η_{me} ou respectivamente entre potência estimada pelo modelo \dot{Q}_{mo} e a medida \dot{Q}_{me} ;
- Salva os resultados da medição em uma planilha EXCEL™.

Com este programa é possível verificar se o sistema de medição apresenta erros grosseiros de medição. Estes erros podem acontecer, por exemplo, quando a sombra do *anel sombreador* do transdutor da radiação difusa foge da cavidade deste. Possíveis erros deste tipo podem logo ser observados através do painel do programa e rapidamente corrigidos. Outra vantagem do programa é que ele pode ser utilizado como dispositivo de ensino e demonstração nas aulas do Curso de Energia Solar de graduação e pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, assim como em outras entidades.

5.8.1 Cálculo para determinar o ângulo entre o sol e o coletor

O ângulo entre o raio da radiação solar direta incidente e o vetor normal à superfície do coletor θ [°] varia durante um dia de ensaio com o coletor instalado em posição fixa (figura 4). Este ângulo é zero quando o raio solar é orientado perpendicularmente em relação à superfície do coletor, ou o sol estiver em cima do coletor solar. Nesta posição do sol, o ângulo θ é denominado *ângulo teta normal* θ_n . Não existem instrumentos que medem o ângulo θ em todas as condições ambientais porque em dias nublados, os instrumentos não poderiam se alinhar ao sol. Porém, é possível calcular a posição solar, aplicando as equações da astronomia apresentadas por DUFFIE & BECKMANN (1991). Para se calcular o ângulo θ , deve-se primeiramente calcular a hora solar SoT . Esta é definida de forma que no meio dia da hora solar SoT o sol tem o seu ponto mais alto no hemisfério do céu. A hora padrão é diferente nas 24 faixas da terra destinadas a ela, e difere em cada faixa acrescentando uma hora, sendo modificada na taxa de $360^\circ/24h = 15^\circ/h$. A hora solar SoT é particular para os locais de cada longitude da terra. Partindo da

referência deste cálculo de horas, que é a cidade de Greenwich na Inglaterra com o meridiano padrão de 0° , a cidade de Florianópolis localiza-se no meridiano padrão de $L_{st} = 45^\circ$, que corresponde a 3 horas de defasagem da cidade de Greenwich. Para se calcular a hora solar a partir da hora padrão, deve-se defasar a hora padrão com duas correções: (a) uma com o uso da longitude correta do local geográfico de longitude particular e (b) outra com a utilização da *equação do tempo* E [s]. A segunda correção se utiliza porque a terra tem em função do dia do ano um pequeno deslocamento na orientação da longitude que faz com que a hora solar deva ser corrigida com $E = f(n)$, onde a função de E é denominada *equação do tempo*. Com $n = (1 \text{ a } 365)$ dias, E é inferior a ± 17 min. Com estas correções, pode-se calcular a hora solar SoT [s] utilizando a equação que segue

$$SoT = \frac{3600s}{15^\circ} (L_{st} - L_{lo}) + E + ST \quad (20)$$

onde ST [s] corresponde à hora padrão de um determinado local geográfico, $L_{st} [^\circ]$ é a longitude referente ao meridiano padrão do tempo local e $L_{lo} [^\circ]$ corresponde ao valor da longitude do meridiano local.

O deslocamento pela *equação do tempo* E [s] é calculado com a expressão

$$E = 229,2 \left[\begin{array}{l} 0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B \\ - 0,014615 \cos(2 B) - 0,04089 \sin(2 B) \end{array} \right] 60 \quad (21)$$

sendo o ângulo B $[^\circ]$ calculado com o dia do ano $n = (1 \text{ a } 365)$ com a equação que segue

$$B = (n - 1) 360/365 \quad (22)$$

Transformando os 24 x 3600 s da hora solar em graus (24 x 3600 s = 360 °), obtém-se a hora solar ω [°], que tem a sua origem em 0° no meio dia solar, sendo ela de manhã definida como negativa e à tarde como positiva. O ângulo ω é calculado com a equação que segue

$$\omega = \frac{SoT}{\frac{24h}{360^\circ} \frac{3600s}{h}} - 180^\circ \quad (23)$$

Não somente em direção da longitude, mas também em direção da latitude a terra tem um deslocamento em função do dia do ano n , que é denominado *ângulo da declinação* δ , e é responsável pela altura máxima do sol no meio dia solar. Este ângulo é calculado com a equação que segue

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(360^\circ \frac{284 + n}{365}\right) \quad (24)$$

A terra gira em um eixo em torno do sol e gira por si mesma em um segundo eixo. Quando ambos estão em paralelo, que acontece duas vezes por ano (tabela 1, página 74), o ângulo δ é igual a 0°. Segundo DUFFIE & BECKMANN (1991), sendo ω e δ conhecidos, pode-se calcular o ângulo θ com a equação que segue

$$\theta = \arccos \left[\begin{array}{l} \operatorname{sen} \delta \sin \phi \cos \beta - \\ \operatorname{sen} \delta \cos \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma + \\ \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \varpi + \\ \cos \delta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ \cos \delta \sin \beta \operatorname{sen} \gamma \sin \omega \end{array} \right] \quad (25)$$

Sendo ϕ a latitude do local geográfico onde é feito o ensaio, β a inclinação com que o coletor foi montado, que é o ângulo entre uma superfície horizontal e a superfície do coletor (no ensaio foi utilizado 29 °) e γ o ângulo de azimute do coletor, que é a orientação de pontos cardeais para onde a superfície do coletor é orientada (no

ensaio foi utilizado 175°). Verifique também as faixas de ângulos que aparecem no projeto na tabela 1.

Tabela 1: Faixas dos ângulos que determinam a posição do sol em relação da terra

Nome do ângulo	Símbolo	Definição da faixa	Faixa °
Ângulo horário	ω	(0 a 12) h	$-(180 \text{ a } 0)^\circ$
	ω	(12 a 24) h	$(0 \text{ a } 180)^\circ$
Declinação	δ	n = 356 a 80 (dia 21.12 a 20.03) Solstício ao equinócio do verão	$(-23.45 \text{ a } 0)^\circ$
	δ	n = 80 a 173 (dia 20.03 a 21.06) Equinócio ao solstício do inverno	$(0 \text{ a } 23.45)^\circ$
	δ	n = 173 a 266 (dia 21.06 a 22.09) Solstício ao equinócio do inverno	$(23.45 \text{ a } 0)^\circ$
	δ	n = 266 a 356 (dia 22.09 a 21.12) Equinócio ao solstício do verão	$(0 \text{ a } -23.45)^\circ$
Latitude do local	ϕ	Equador ao pólo sul	$(0 \text{ a } -90)^\circ$
		Equador ao pólo norte	$(0 \text{ a } 90)^\circ$
Inclinação do coletor	β	Horizontal a Perpendicular	$(0 \text{ a } 90)^\circ$
Azimute do coletor	γ	Sul a Leste	$(0 \text{ a } -90)^\circ$
	γ	Leste a Norte	$(-90 \text{ a } -180)^\circ$
	γ	Norte a Oeste	$(-180 \text{ a } +90)^\circ$
	γ	Oeste a Norte	$(90 \text{ a } 0)^\circ$

5.9 Transdutores

5.9.1 Transdutores para medição da radiação

O modelo quase-dinâmico do ensaio de coletores utiliza as radiações global G , direta G_b e difusa G_d , que incidem no âmbito da superfície do coletor, visto que $G = G_b + G_d$, necessita-se somente de dois instrumentos de medição para se medir estas radiações. As normas EN12975 e ISO 9806 especificam que as radiações solares devem ser medidas com transdutores de medição da potência térmica que possa ser convertida através destas radiações de onda curta (também denominados *piranômetros*) do tipo *padrão secundário*. Os padrões dos instrumentos que medem

a potência da radiação estão estabelecidos pela norma ISO9060 (1990). Nos ensaios executados, foram utilizados transdutores do fabricante Kipp & Zonen do tipo CM10, que têm a mesma especificação (*padrão secundário*) que os piranômetros do tipo CM11, segundo o fabricante. A possibilidade de geração de energia de aquecimento através do sol é medida através do efeito térmico, que é medido com termopares. Estes são montados no lado inferior de uma chapinha (denominada *cavidade*) com alta absorvância da radiação solar em todo o seu espectro de onda. Dois domos de cristal protegem a cavidade e evitam o resfriamento dela pela temperatura ambiente (ar com temperatura ambiente - perda de condução, vento - perda de convecção e radiação de onda longa do céu - perda de radiação). Os termopares medem a diferença da temperatura entre o corpo do piranômetro e a cavidade. O corpo é mantido para temperatura ambiente através de uma ventilação artificial. A radiação do sol aquece a cavidade em relação à temperatura ambiente e o conjunto de termopares gera uma tensão que é proporcional à radiação solar de aproximadamente (0 a 10) mV para (0 a 1100) W/m^2 de radiação. Na bancada foram utilizados 2 piranômetros do tipo *padrão secundário* (CM10) e um piranômetro do tipo *classe secundária* (CM3) do mesmo fabricante (Anexo 1). Os piranômetros de padrão secundário foram utilizados para medição da radiação difusa e da radiação global. O piranômetro de classe secundária foi utilizado para verificar se o coletor está parcialmente sombreado, através de um objeto que obstrui o sol e cria uma sombra em cima do coletor. Para verificar a obstrução, foi montado um piranômetro que mede a radiação global acima do coletor e outro que mede a radiação global abaixo do coletor (verifique na figura 4). Na seleção, as duas radiações estão sendo comparadas e quando a diferença entre elas é maior que $120 W/m^2$, pode-se considerar que houve sombreamento. Esta condição foi incluída para a desqualificação das medições em condições desfavoráveis. Os transdutores utilizados do tipo CM10 fazem parte do inventário do laboratório LABSOLAR deste 1992 e segundo o fabricante, o transdutor CM 10 tem a mesma especificação que o CM11 que é: Incerteza diária: inferior a 3%; Impedância (10 a 100) Ω ; ano da compra: 1992. Verifique também detalhamento nas especificações completas no Anexo 1. Atualmente o piranômetro CM10 não é mais comercializado.

5.9.2 Transdutores para medição da radiação difusa e global

A radiação global consiste na soma da radiação direta do sol e da radiação difusa. A radiação direta é irradiada diretamente vindo da direção do sol, enquanto que a radiação difusa vem de todas as direções do hemisfério do céu, pois ela é a radiação refletida por partículas, denominados aerossóis (nuvens, poeira etc.), da atmosfera.

Com os piranômetros são medidas as radiações difusa e global nos mesmos ângulos de inclinação β e azimute γ do coletor, sendo assim expostos para a mesma parte do hemisfério.

5.9.3 Transdutor para medição da radiação difusa

Para medir a radiação refletida por qualquer aerossol é necessário obstruir a parte da radiação que vem da direção do sol, denominada radiação direta. As normas para ensaios de coletores permitem medir a radiação difusa com um dispositivo, denominado de *anel sombreador* (item 2, figura 6), que sombreia um piranômetro instalado na inclinação do coletor a ser ensaiado (item 3, figura 6).



Figura 6 – Transdutor para a medição da radiação difusa – legenda: piranômetro (transdutor de radiação global) (1), dispositivo *anel sombreador* (2), ajuste do ângulo de inclinação β do piranômetro no centro do *anel sombreador* (3), ajuste da posição do anel no eixo geográfico da terra (4).

Isto tem a vantagem de não se necessitar de um dispositivo automatizado, mantendo o eixo do *anel sombreador* sempre paralelo com o eixo geográfico da terra. É necessário ajustar o *anel sombreador* (deslizando este no seu eixo) somente de dois em dois dias. O paralelismo dos eixos é garantido ajustando-se o eixo do *anel sombreador* ao ângulo da latitude do local (em Florianópolis de $27,5^\circ$). Na figura 6, é visível que o *anel sombreador* obstrui uma parte relativamente grande do hemisfério. Desta parte não se possa medir a energia que a radiação difusa gera e assim obtém-se um erro de medição que deve ser corrigido.

5.9.4 Correção do erro de medição da radiação difusa

Segundo o manual do *anel sombreador*, a correção deve ser calculada com a equação que segue

$$C = 1 / (1 - S) \quad (26)$$

onde S é o fator de visibilidade, que define aquela parte do hemisfério do céu que é inibido pelo *anel sombreador* ao chegar à superfície do piranômetro. Este fator é calculado com a equação que segue

$$S = 2 V \cos(\delta) (\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \sin(\omega_s) \cos(\phi) \cos(\delta)) / \pi \quad (27)$$

onde V é o ângulo de obstrução do anel de sombreamento a partir do centro do domo do piranômetro. Esse ângulo depende da altura da cavidade do piranômetro que é instalado neste anel. O fabricante especifica este ângulo com $V = 10,6^\circ$. O valor de V varia em 2% em função da declinação δ da terra. Segundo o manual, esta variação gera somente um erro de $\pm 0,5\%$ no fator de correção (equação 26) e assim do resultado de medição, que é calculado com as equações geométricas apresentadas pelo manual deste transdutor. δ é o ângulo da declinação da terra, ϕ é o ângulo da latitude e ω_s é o ângulo horário entre o nascer do sol e o meio-dia solar,

com o valor absoluto deste igual ao ângulo entre o meio-dia solar e o pôr-do-sol segundo o manual e DUFFIE & BECKMANN (1991). Para uma superfície horizontal ω_s é calculado com a equação que segue

$$\omega_s = -\tan(\phi) \tan(\delta) \quad (28)$$

Como o pôr-do-sol e o nascer do sol para uma superfície inclinada acontecem com retardamento, comparado a uma superfície horizontal, foram calculadas (com os cálculos apresentados por DUFFIE & BECKMANN (1991) no seu capítulo 1.6) para todos os dias o pôr-do-sol e o nascer do sol para Florianópolis utilizando os ângulos β e γ do coletor. A curva obtida do ângulo de ω_s em função do dia do ano foi reconstruída com um polinômio, que substitui a equação (28).

A norma EN12975 não especifica o método para calcular a correção da medição da radiação difusa, portanto MUNEER (2002) apresenta um método em que observou em dois locais com diferentes características climáticas o erro RMSE de 17 W/m^2 . Para um método apresentado por DRUMMOND (1964), o autor MUNEER (2002) obteve o RSME máximo de $\pm 23 \text{ W/m}^2$. O autor ABREU (1999) obteve com a utilização de um método apresentado por DEHNE (1984) um RMSE de $\pm 3,45 \text{ W/m}^2$.

5.9.5 Transdutor para medição da vazão

Coloca-se um campo magnético a um tubo em que flua um fluido que tem características condutivas, gera-se um transporte de íons (partículas com uma carga elétrica) transversal ao campo magnético. Com os eletrodos colocados com uma defasagem de 90° em relação ao campo magnético, pode-se medir este transporte de íons, medindo uma tensão nos eletrodos que é proporcional à velocidade do fluido e assim à sua vazão volumétrica. O transdutor utilizado já tem um transmissor incluído, que transforma esta tensão em um sinal de (4 a 20) mA.

Como é visível na equação (3), pg. 30, é necessário medir a vazão mássica para medir a potência de aquecimento. Com um Pt100 adicional colocado na entrada do medidor de vazão, é medida a temperatura do fluido, com a qual, através da vazão volumétrica, calcula-se a vazão mássica. O transdutor de vazão tem as seguintes especificações: fabricante: Krohne-Conaut; Modelo: IFS4000W/6; Resistividade

máxima da água: 200 k Ω /cm, faixa de medição (0 a 200) litros/hora; incerteza: menor que 1%.

Uma resistência *shunt* de 100 Ω com baixa incerteza (Anexo 1) é utilizada para medir esta corrente de (4 a 20) mA na entrada da unidade de medição. A resistência tem a seguinte especificação: tolerância em 25°C: $\pm 0,01$ %; coeficiente de temperatura: 0,8 m Ω /°C¹³; potência: 0,25 W. Nesta resistência, a corrente de (4 a 20) mA, que corresponde a uma vazão de (0 a 200) l/h, é transformada em uma tensão de (0,4 a 2) V, cuja medição é feita com o *datalogger*.

5.9.6 Transdutor para medição das temperaturas no fluido

Para medição das temperaturas, foram comprados termorresistências do tipo Pt100 / classe A do fabricante IOPE (figura 7).



Figura 7 – Transdutor de temperatura Pt100, rosqueado em uma conexão de tubulação do tipo T de 3/4” da norma NPT utilizado para medir as temperaturas na entrada e saída do coletor assim como a temperatura da água ao lado do medidor de vazão volumétrico

Essas foram adaptadas ao processo com conexão de rosca do tipo 3/4” NPT. Os transdutores têm uma bainha com comprimento de 80 mm e 3 mm de diâmetro (figura 7).

¹³ Pelo fabricante especificado em ppm (*parts per million*) onde 1 ppm = 0,0001 %

5.9.7 Transdutor para medição da temperatura ambiente

Foi elaborado e construído um dispositivo (item 9 da figura 4, pg. 61), em que uma termorresistência do tipo Pt100 é montada, que mede a temperatura ambiente. Neste dispositivo, a termorresistência é montada na parte inferior. Através de um ventilador, que é montado na parte superior, esta é sempre cercada por um fluxo de ar aproximadamente constante, mantendo assim as recomendações dadas pelas normas (EN12975 e ISO9806) de ensaios de coletores.

5.9.8 Transdutor para medição do fluxo de ar (anemômetro)

Como a variação do vento gera variação nas perdas térmicas do coletor, deve-se medir a velocidade deste vento, que aqui é denominado de *fluxo de ar*, pela sua orientação paralela à cobertura do coletor. O transdutor utilizado é um anemômetro de copo, que é o transdutor mais difundido atualmente para medições de vento. Ele consiste num eixo, onde é montada uma cruz com 3 pontas, cada uma 120° defasada da outra, e copos do tipo *meio esfera*, que são acionados pelo vento (item 2 da figura 4). Através de um opto-acoplador colocado sobre uma roda com furos dentro do instrumento, é gerada uma frequência, que é proporcional à velocidade do vento e é medida com o sistema de medição. Este transdutor tem as seguintes especificações: Fabricante: Thies / Alemanha; modelo: 4.3303.22; faixa de medição: (0,3 a 50) m/s; frequência de saída: (3 a 1042) Hz; incerteza: $\pm 0,3$ m/s ou $\pm 2\%$ do valor medido; ano da compra: 1992.

5.10 Calibração dos transdutores

5.10.1 Transdutores para medir o fluxo de ar sobre o coletor / anemômetro

O anemômetro de copo utilizado, mostrado na (item 2 da figura 4), foi calibrado por um anemômetro do tipo hélice (Anexo 1) pelo método da comparação. Este padrão utilizado tem a seguinte especificação: Fabricante: YOUNG; modelo: 05106 Wind monitor MA; incerteza: ($\pm 0,3$) m/s.

A hélice do anemômetro 05106 está montada no dispositivo que mede a direção do vento. Quando o eixo da hélice está alinhado com a direção do vento, o anemômetro

mede corretamente a velocidade do vento. No caso de variações bruscas da direção do vento, a medição da velocidade gera um erro, pois o transdutor 05106 precisa primeiramente alinhar-se na direção do vento para depois fazer uma medição correta. Os transdutores de copo e o de hélice foram montados em cima de uma torre de aproximadamente 15 m de altura, que é localizada no topo do prédio B do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Durante três semanas foram medidos os sinais dos dois transdutores, coletando dados com intervalos de 1 s, utilizando um *datalogger* do tipo HP 34970A e um programa de aquisição de dados programado no Software LABVIEW. Para excluir os erros gerados pelo efeito de alinhamento, foram somente selecionadas aquelas medições em que a direção do vento permaneceu relativamente constante.

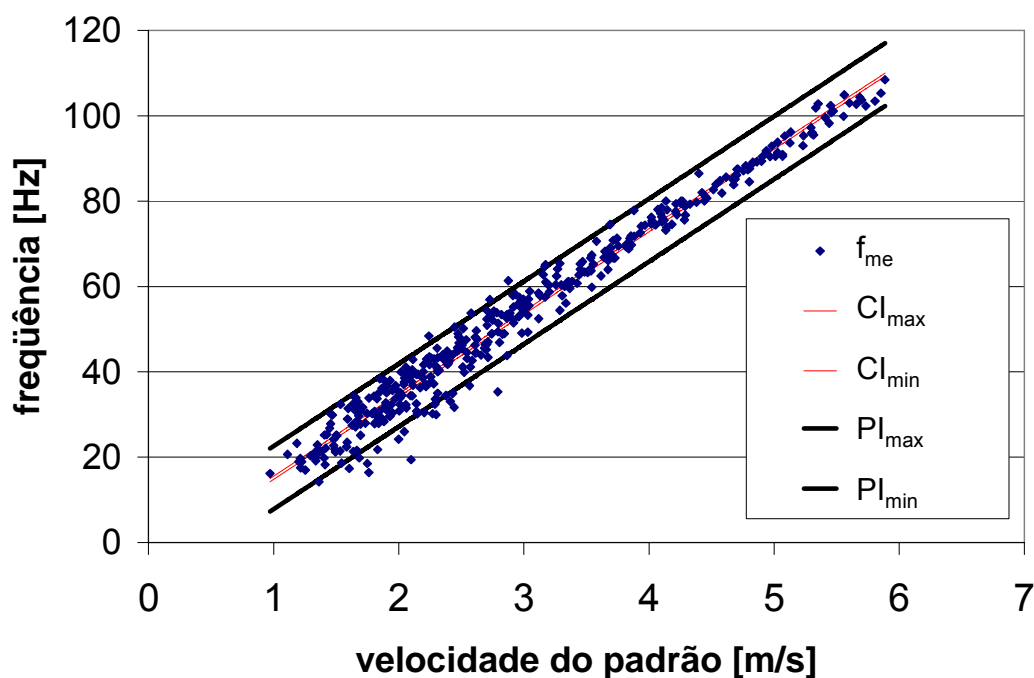


Figura 8 – Curva de calibração do anemômetro – legenda: frequência medida do anemômetro de copo f_{me} ; intervalo de predição entre PI_{min} e PI_{max} , intervalo de confiança entre CI_{min} e CI_{max}

Na figura 8 pode-se ver a frequência apresentada pelo instrumento calibrado em função do valor de referência da velocidade do vento, medida com o instrumento padrão de hélice, para as amostras selecionadas. Observe o pequeno intervalo de confiança (que corresponde à incerteza da resposta média como pode ser visto

também no item 6.3.2). Verifique o balanço de incertezas da calibração no apêndice 4, pg. 180.

5.10.2 Transdutores de temperatura

Pela norma IEC-751 (1983), o transdutor de temperatura Pt100 / Classe A é especificado com a incerteza de $\pm (0,15 + 0,002 T) K$, onde o $T [^{\circ}C]$ é o valor absoluto da temperatura medida (verifique também as características desta termorresistência no Anexo1). Como essa incerteza não cumpre as exigências especificadas pelas normas ISO 9806 e EN12975 para a medição das temperaturas (incerteza deve ser inferior a 0,07 K, item 3.5.5), foi realizada uma calibração no laboratório LATER da Fundação CERTI em Florianópolis. Para todas as termorresistências, foi sempre utilizada, tanto na calibração como na medição, a *medição a quatro fios* (AGILENT- *USERS GUIDE* , 1997) na qual dois fios alimentam a termorresistência com uma corrente constante de 1 mA e dois fios são utilizados para medir a tensão da termorresistência.

Para obter mínimas incertezas nas medições como as termorresistências, foram mantidas as mesmas configurações das ligações das termorresistências na placa multiplexadora tanto na sua calibração quanto nas medições nos ensaios do coletor. Foi desenvolvida uma rotina no software LABVIEW que realiza a leitura automática durante a calibração dos oito sensores do tipo termorresistência Pt100 e recebe a leitura manual do termômetro de referência, inserida por digitação. O conjunto de medições da calibração é automaticamente salvo em uma planilha EXCEL™. Durante a calibração a referência e os 8 transdutores Pt100 foram mergulhados em um banho criostático. Para obter quatro pontos de medição, distribuídos na faixa de medição das termorresistências, as seguintes temperaturas foram ajustadas nesse banho: 1.) 10°C, 2.) 33°C, 3.) 56°C, 4.) 80°C. As medições foram utilizadas para realizar uma regressão com um polinômio de 3. grau (equação 29), utilizando o método de regressão multilinear, onde W_1 à W_3 são as variáveis desta regressão, A à D são os coeficientes de regressão, $T_p(R_x) [^{\circ}C]$ é a temperatura do banho, medida com a termorresistência padrão, $R_x [\Omega]$ é a resistência da termorresistência a ser calibrada e $R_0 [\Omega]$ é a resistência desta no ponto do gelo (0 °C), obtido pela calibração. Os coeficientes de (A) a (D) da equação (29) são os coeficientes do polinômio da termorresistência a ser calibrada.

$$T_p(R_X) = A + B \overbrace{\left(\frac{R_X}{R_0}\right)}^{W_1} + C \overbrace{\left(\frac{R_X}{R_0}\right)^2}^{W_2} + D \overbrace{\left(\frac{R_X}{R_0}\right)^3}^{W_3} \quad (29)$$

A resistência R_0 foi medida com um banho de gelo produzido com água desmineralizada. Com o *datalogger* do tipo HP34970 foram registradas indicações das termorresistências sob calibração.

Foram observados problemas no banho criostático para controlar temperaturas mais altas (acima de 80 °C) por causa da presença de um pequeno desvio de aproximadamente 0,12 K/h neste banho. Embora relativamente pequeno, os efeitos deste desvio foram minimizados pelo uso dos $n = 321$ valores individuais (equações (30) e (31)), medidos nas 4 temperaturas (mais que 38 valores em cada temperatura), em vez de utilizar as médias de cada temperatura para determinar os coeficientes das termorresistências a ser calibrada,

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left(T_{p,i}(R_{X,i}) - T_{c,i} \right)^2 \rightarrow \min \quad (30)$$

onde T_c é a temperatura da termorresistência a ser calibrada e SS_E (compare também equação (33), pg. 95) é a *soma dos mínimos quadrados*.

$$SS_E = \sum_{i=1}^n \left(T_{p,i}(R_{X,i}) - \left[A + B \overbrace{\left(\frac{R_{X,i}}{R_0}\right)}^{W_1} + C \overbrace{\left(\frac{R_{X,i}}{R_0}\right)^2}^{W_2} + D \overbrace{\left(\frac{R_{X,i}}{R_0}\right)^3}^{W_3} \right] \right)^2 \rightarrow \min \quad (31)$$

Foram realizadas regressões lineares múltiplas, onde W_1 a W_3 são as variáveis de regressão e A a D são os coeficientes de regressão. Os coeficientes obtidos destas regressões, assim como as resistências medidas no ponto de gelo, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes A a D e da resistência no ponto de gelo do termômetro padrão e dos transdutores utilizados

	A	B	C	D	R_0
Termômetro padrão	-245,9864	237,1186	8,2937	0,5772	100,0068
Transdutor T_{in}	-256,2179	264,7879	-16,5235	8,0249	99,9776
Transdutor T_{out}	-255,7270	263,2429	-14,9275	7,5028	100,0092
Transdutor T_a	-255,7937	262,6304	-13,8334	7,0744	100,0144

A figura 9 mostra as diferenças encontradas entre os valores obtidos de uma das 8 termorresistências calibradas (aplicando os coeficientes de regressão obtidos) e as medições da termorresistência padrão junto com os intervalos de confiança e de predição (compare também apêndice 4, item 4.1, pg. 195). A significância do terceiro coeficiente D de regressão foi confirmada, aplicando a equação (17), pg. 55, onde se obteve para a relação $a_j/\sigma(a_j)$ o valor de 8,3. Compare também MONTGOMERY & PECK, 1992, no seu capítulo (4.4.2 - *tests on individual regression coefficients*).

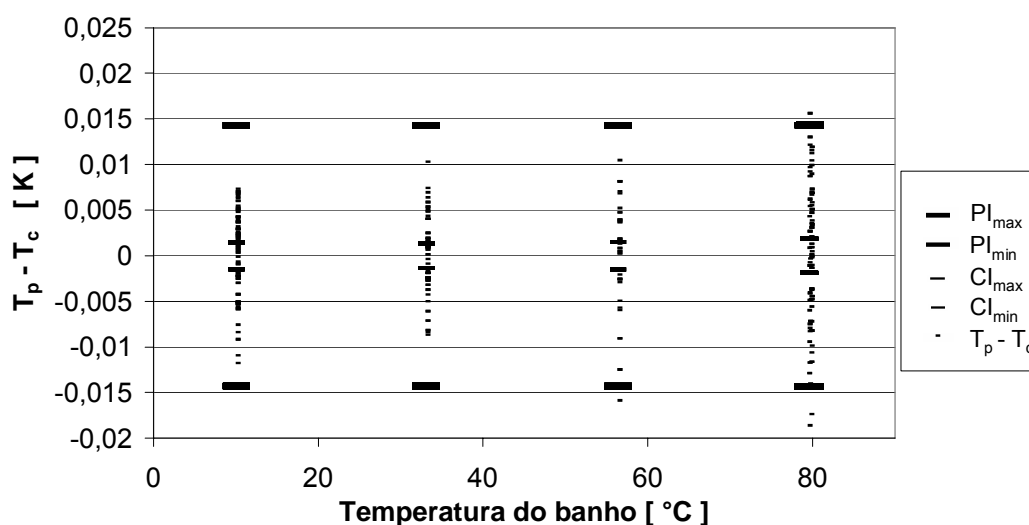


Figura 9 – Diferenças entre o valor da temperatura medida com a termorresistência padrão T_p e o valor da termorresistência calibrada T_c junto aos intervalos de confiança CI e de predição PI ajustados

5.10.3 Transdutores para medir a radiação solar

Os piranômetros do tipo CM10 (considerados padrões secundários) foram calibrados usando como referência um piranômetro do tipo CM22 (que também é classificado como padrão secundário), porém com uma incerteza inferior a do piranômetro

CM10. O método que foi adotado para esta calibração é o de comparação em ambiente externo (*outdoor*), normatizado pela ISO9847(1992). Neste método, os dois piranômetros são expostos às condições atmosféricas naturais. Na calibração são apenas consideradas as medições obtidas em condições em que a radiação solar não varia muito bruscamente, evitando assim desvios provocados por respostas dinâmicas diferentes. Com estas medições é determinado o coeficiente de sensibilidade, algumas vezes referido no jargão técnico como fator de calibração (ISO9847, 1992). Para conseguir uma baixa repetitividade na calibração foram somente selecionados os dados com um ângulo zênite abaixo de 40° e radiação solar acima de 800 W/m².

5.10.4 Transdutor para medição da vazão

Segundo o fabricante, o transdutor de vazão volumétrica foi calibrado conforme as normas ISO5168, ISO 8316, ISO 4185 e NBR ISO/IEC 17025 com três leituras no transdutor a ser calibrado para as vazões do padrão de: 0 l/h; 50,08 l/h; 99,98 l/h; 150,05 l/h e 200,05 l/h (Anexo1). A incerteza do ensaio de calibração foi de $\pm 0,11\%$.

5.10.5 Unidade de medição e multiplexação (datalogger)

O datalogger HP34970A foi calibrado com a utilização do calibrador do tipo 9100 *Multifunction Calibrator* do fabricante WAVETEK/DATRON. Por causa de um defeito num elemento de manuseio digital do *Multifunction calibrator* (certificado de calibração deste calibrador em Anexo 1), não se pôde repetir várias medições e assim a incerteza de calibração do HP34970A não pôde ser determinada.

5.10.6 Padrão utilizado para a calibração

Incertezas obtidas na calibração do *Multifunction Calibrator* na faixa de medição utilizada de 300 mV podem ser obtidas através do certificado de calibração (Anexo 1) deste calibrador.

5.11 Balanço de incertezas de medição dos transdutores, utilização e considerações sobre estas incertezas

A incerteza resultante do balanço de incertezas para as condições de medição é obviamente maior que a resultante do balanço de incertezas da calibração. Ambos os balanços de incerteza estão apresentados no apêndice 4. As incertezas sistemáticas dos transdutores influenciam os resultados do ensaio (item 5.11.3), portanto elas devem ser consideradas.

5.11.1 Incertezas expandidas

As incertezas expandidas de medição dos transdutores (Apêndice 4) devem ser inferiores às incertezas admissíveis determinadas pelas normas EN12975 e ISO9806, especificadas no item 3.5.5.

5.11.2 Incertezas aleatórias

As incertezas aleatórias dos transdutores e do *datalogger* se transformam em incertezas dos coeficientes de regressão (verifique a dedução em apêndice 1, pg. 160 e ISO-GUM, 2003). Considerando as incertezas desses coeficientes, as incertezas aleatórias dos transdutores utilizados no ensaio não necessitam ser consideradas.

5.11.3 Incertezas sistemáticas

Para os piranômetros, onde não foi possível corrigir as incertezas sistemáticas por serem de característica não conhecida, estas incertezas são separadamente consideradas no item 6.16. Os desvios temporais dos transdutores de temperatura e do transdutor de vazão volumétrica não foram considerados neste trabalho, primeiro porque os ensaios foram executados dentro de 4 meses após a calibração dos componentes do sistema de medição, segundo por não existirem informações corretas sobre estes desvios (apêndice 4).

5.12 Condições de contorno dos ensaios

No item 3.5 são apresentadas as condições de contorno normatizadas. Dando ênfase, são em seguida apresentadas algumas considerações especiais relativo às condições de contorno utilizadas para o coletor com que foram realizados os ensaios.

5.12.1 Vazão adotada nos ensaios

As normas para ensaios de coletores recomendam uma vazão de $0,02 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$, que equivale a $72 \text{ kg}/(\text{h m}^2)$. Porém, as normas também permitem ensaiar os coletores em vazões diferentes de $0,02 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$, caso o fabricante defina uma vazão especial para o seu coletor. O coletor utilizado para os ensaios apresentou problemas de operação em altas temperaturas devido às perdas altas em decorrência de ter um isolamento térmico insuficiente nas laterais da sua moldura externa. Com vazões menores, o transporte da energia através da água aquecida é menor, produzindo assim um $(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$ maior no coletor. Para se possibilitar a medição com temperaturas $T_m = (T_a + 60) \text{ K}$, a vazão durante os ensaios foi reduzida para aproximadamente $60 \text{ kg}/(\text{h m}^2)$. Com estas condições o coletor gera energia, com a radiação solar global acima de $700 \text{ W}/\text{m}^2$ (figura 2, pg. 34).

5.12.2 Verificação da existência de turbulência na vazão ajustada

Para um tubo pode-se calcular o número de Reynolds segundo (DUFFIE & BECKMANN, 1991) e (LIENHARD & LIENHARD, 2005) com a equação que segue

$$\text{Re} = \frac{V_f D}{\nu} = \frac{(\dot{V}/A)D}{\nu} = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} = \frac{V_f D \rho_f}{\mu} \quad (32)$$

Onde V_f [m/s] é a velocidade do fluido, \dot{V} [m³/s] é a vazão volumétrica, \dot{m} [kg/s] é a vazão mássica, D [m] é o diâmetro interno do tubo, A_t [m²] é a secção do tubo, ρ_f [kg/s] é a densidade da água, ν [m²/s] é a viscosidade cinemática que é uma constante de valor $3,6 \times 10^{-4}$ para a água e $\mu = \nu \rho_f$ é a viscosidade dinâmica. Para um tubo, a transição entre escoamento laminar e turbulento ocorre entre $\text{Re} \sim (1800$

a 2500). Com um diâmetro interno de 27,2 mm do tubo do absorvedor, uma vazão média do coletor de 60 kg/(m²h), uma área de abertura de 1.3613 m² e de oito tubos no coletor, obtém-se o número de Reynolds de $Re = 2,95$, que corresponde a uma vazão laminar.

5.12.3 Exclusão de pontos de medição para pontos que não se localizam no I quadrante da curva de eficiência do coletor

A curva padrão da eficiência do coletor (figura 3, pg. 35) localiza-se no I quadrante. Esta situação é dada quando a eficiência do coletor é positiva e a temperatura média é maior que a temperatura do ambiente. Porém, existem situações em que os pontos de medição podem fugir para o II ou para o IV quadrante (itens 6.2.7 e 6.2.8). Foram observadas instabilidades na inclusão destes pontos, e como esses pontos de medição não são importantes para construir a *curva de eficiência padronizada*, também não foram incluídos na regressão.

6 RESULTADOS

6.1 Ensaios de coletores

Durante 3 meses foram obtidas medições, realizando os ensaios com o mesmo coletor, seguindo as especificações das normas EN12975 e ISO9806 para a operação de ensaios do tipo SST e QDT (itens 3.5 a 3.8). Com os procedimentos de seleção padrão (EN12975, 1998 e ISO9806, 1993) foram obtidos os dados para a avaliação de vários ensaios completos. Por causa de problemas de estabilidade da temperatura de entrada e da vazão (item 6.2.3 a 6.2.5, pg. 92) foram obtidas através da seleção apenas uma amostra para avaliação do SST e 4 para a do QDT. Com o procedimento de avaliação padrão, que é a regressão multilinear, foram obtidos, para as diferentes amostras selecionadas, os coeficientes do coletor que são apresentados juntos com as incertezas destes no item 6.3.1. Com os coeficientes, pode-se estimar a potência térmica do coletor \dot{Q}_{mo} através do modelo do coletor (equação 12, pg. 36) e comparar esta com a potência medida \dot{Q}_{me} (equação 3, pg. 30], como é apresentado na figura 10.

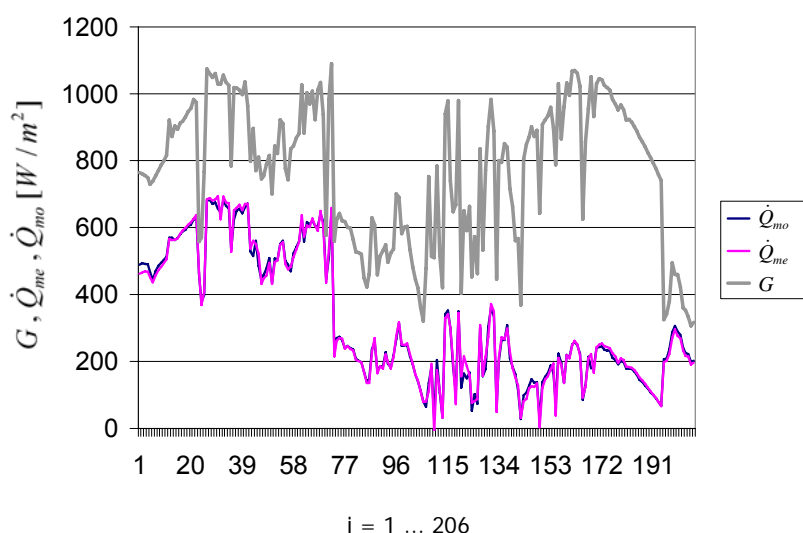


Figura 10 – Potência da radiação solar G , potência térmica medida Q_{me} e potência estimada pelo modelo Q_{mo} em função de $n = 206$ valores médios de 5 min para o ensaio QDT de um coletor

Nesta figura foram colocadas as medições \dot{Q}_{me} de vários dias de um ensaio QDT completo em seqüência. Observa-se que a potência térmica do modelo \dot{Q}_{mo}

caracteriza muito bem o valor da potência térmica medida \dot{Q}_{me} . Observa-se também a baixa conversão da potência da radiação solar G , quando o coletor é operado com temperaturas maiores no ensaio (o que aconteceu a partir do valor $n = 77$).

A figura 11 mostra os valores absolutos das energias aparentes durante um ensaio QDT, que foram obtidos com a equação (12), pg. 36. A maior parte da energia $Q_1 = 5596 \text{ Wh/m}^2$ é convertida através da radiação direta, através da radiação difusa é convertida $Q_3 = 1906 \text{ Wh/m}^2$. Com o modelo do ângulo θ da radiação solar ($a_2 X_2$ da equação (12), pg. 36) obtém-se o baixo valor de $Q_2 = 96 \text{ Wh/m}^2$, decorrente do aumento da refletância e da absorptância da cobertura (figura 25, pg. 216) e da redução da absorptância do absorvedor (equação 148, pg. 217] para ângulos de $\theta > 0^\circ$. As perdas térmicas quadráticas $Q_5 = 601 \text{ Wh/m}^2$ também são muito baixas. Maiores perdas foram observadas na função linear (perdas de condução) $Q_4 = 2309 \text{ Wh/m}^2$. A parte dinâmica do modelo não é demonstrada na figura 11. Esta consiste de 155 Wh/m^2 de energia absorvida pelas capacitâncias térmicas do coletor e de -136 Wh/m^2 de energia devolvida pelas mesmas durante o ensaio.

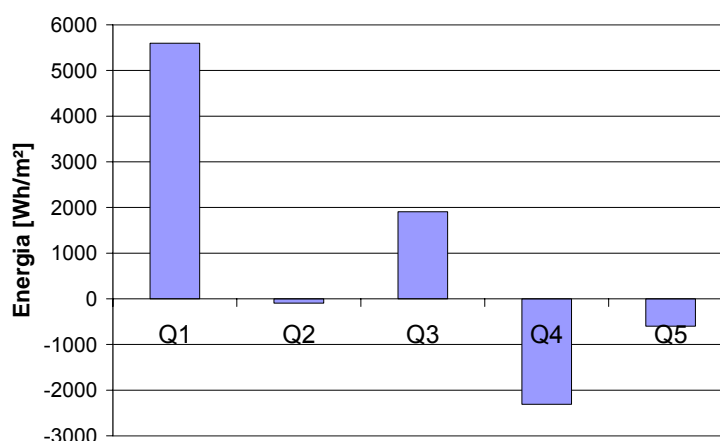


Figura 11 – Energias em um ensaio QDT - legenda: Q1 energia convertida através da radiação direta, Q2 energia perdida pelo aumento da reflexão da radiação direta para $\theta > 0$, Q3 energia convertida através da radiação difusa, Q4 é a perda de energia para o ambiente por condução térmica, Q5 é a perda por efeitos de radiação e convecção

As duas partes somam em 19 Wh/m^2 , que deve ser contabilizado como incerteza no balanço de incertezas. Das cinco partes de energia, apresentadas na figura 11, duas partes (Q_1 e Q_3) são convertidas através da radiação solar durante um ensaio QDT e três partes (Q_2 , Q_4 e Q_5), que equivalem a uma taxa de 40%, apresentam-se como

perdas térmicas. Estas podem ser reduzidas, principalmente, com um melhor isolamento térmico do coletor (Q_4).

6.2 Seleção das amostras médias

Em seguida, são apresentadas algumas condições de ensaios, onde as especificações fugiram da norma e devem, por esta razão, ser aqui comentadas.

6.2.1 Fração difusa

Os ensaios de coletores solares (QDT e SST) são executados com condições de radiação solar distintas. A máxima participação da radiação difusa no ensaio em regime permanente é de 30%. No ensaio em regime quase dinâmico a participação pode ser de até 50%, como a norma EN12975 determina. Na atual revisão desta norma (CEN - AMENDMENT to EN12975-1&2, 2003) é alegado que se deve remover a especificação supérflua de $G_d/G < 0,5$ para a fração difusa F_D , porém, é comentado na mesma referência que ainda não existe consenso para a remoção deste critério. KRATZENBERG et al. (2005) demonstram a estabilidade estatística dos coeficientes do modelo e baixas incertezas na energia estimada pelo modelo, para o ensaio quase dinâmico, obtendo assim consenso para a adoção do critério $F_D = (0 \text{ a } 1)$.

6.2.2 Ângulo da radiação solar

O ângulo θ do ensaio em regime quase dinâmico não tem limite definido pela norma, porém, na seleção dos dados utilizados para a regressão, formam excluídos ângulos θ acima de 60° . Isto porque, no livro de DUFFIE & BECKMANN (1991), no seu capítulo 6.17, é alegado que o submodelo ($X_2 a_2$ na equação (12), pg. 36), com o qual estão sendo aproximados os efeitos da redução da absorção pelo absorvedor (incluindo efeitos da cobertura) perde a sua relação linear ($X_2 a_2$) para ângulos de θ acima de 60° .

6.2.3 Temperatura de entrada

Para se medir a energia que o coletor produz, em regime permanente, a temperatura de entrada deve ser estabilizada em $\pm 0,1$ K dentro de um período de medição.

Nesta primeira montagem do sistema, a distância entre o coletor e o controlador da temperatura de entrada é de 20 m. Com esta longa distância era somente possível conseguir estabilidade da temperatura dentro de $\pm 0,2$ K, diferente do que é exigido pela EN12975.

6.2.4 Desvio temporal da vazão

Observou-se nos ensaios um pequeno desvio temporal típico na vazão ajustada durante um intervalo de tempo de um dia. Com os recursos disponíveis no laboratório não foi possível, neste primeiro estado do projeto, comprar um controlador de vazão. Assim, não foi possível cumprir as exigências de variações máximas de ± 5 % para um ensaio, como especificado pelas normas ISO9806 e EN12975. Foram selecionados os dados de vários dias e assim combinados para obter variações máximas de até ± 10 %.

6.2.5 Estabilidade da vazão

Para conseguir a exigência de ± 1 % de variação máxima dentro de um ponto de medição $\bar{X}_{i,15\text{min}}$ (média de 15 minutos) para o SST, foi aumentado o tempo para formar uma média de 30 segundos $\bar{X}_{i,30s}$ para 3 minutos (equação 14, pg. 49).

6.2.6 Medição para verificar o sombreamento do coletor

Para se garantir que o coletor não está sombreado durante as medições, a radiação solar foi simultaneamente medida com dois piranômetros: um localizado no lado superior do coletor e outro localizado no lado inferior (figura 4). Se ambos piranômetros medirem a mesma radiação, considerando-se as faixas de incerteza destes instrumentos, pode-se constatar que o coletor não é sombreado e está exposto a uma radiação solar homogênea. Para se garantir que o coletor não está parcialmente sombreado, a diferença entre os dois instrumentos deve ser inferior a \pm

120 W/m² (item 5.9.1). Isto corresponde aproximadamente ao erro combinado destes dois transdutores de radiação.

6.2.7 Pontos de medição no II quadrante

Quando o coletor é alimentado com água que tem uma temperatura inferior a temperatura ambiente e isto resultar em uma temperatura média do coletor inferior a temperatura ambiente, o termo de $\Delta T/G$ na abscissa troca o sinal e os pontos de medição de eficiência transcorrem assim do primeiro para o segundo quadrante. Observa-se que o coletor nesta situação ainda gera energia térmica, mas não perde energia para a ambiente. Pelo contrario, o coletor é aquecido pela ambiente neste ponto de medição e os pontos de eficiência transcorrem do I para o II quadrante. Os pontos de medição no II quadrante são excluídos pela seleção.

6.2.8 Pontos de medição no IV quadrante

Existem pontos de medição em que o coletor perde mais energia do que gera através da radiação solar. Isto acontece principalmente quando o coletor é operado em altas temperaturas. No caso da eficiência negativa do coletor, a temperatura de saída deste é inferior à temperatura de entrada. Assim, a energia produzida e a eficiência são menores que zero, ou negativas, e os pontos de eficiência transcorrem do I para o IV quadrante.

6.2.9 Resumo dos critérios para seleção de dados utilizados para uma regressão de um ensaio do tipo SST

As condições para a seleção das medições apresentadas pela norma EN12975 e ISO 9806, assim como as considerações dos itens 6.2.3 a 6.2.8 são em seguida apresentadas de forma resumida:

- Variação da radiação Global ($G \pm 50$) W/m²;
- Radiação Global ($700 < G < 1100$) W/m²;
- Participação da radiação difusa menor que 30 % (Fração difusa $G_d/G < 0,3$);

- Fator de correção do ângulo de incidência para a radiação direta: $K_{ob}(\theta) > K_{ob}(\theta_n) - 2 \%$;
- $G_{up} = G_{down} \pm 100 \text{ W/m}^2$;
- Velocidade do ar em cima da abertura do coletor: $v = (3 \pm 1) \text{ m/s}$;
- Estabilidade da temperatura ambiente: $T_a \pm 1 \text{ K}$;
- Diferença da temperatura entre entrada e saída do coletor, $T_{out} - T_{in} > 1 \text{ K}$;
- Temperatura média do coletor em relação à temperatura ambiente; $T_m > T_a$;
- Intervalo médio de tempo de amostragem: $\tau_a = (6,0 \pm 0,1) \text{ s}$;
- Variação máxima da vazão mássica por área de abertura do coletor dentro de um ensaio completo: $60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h}) \pm 5 \%$;
- Variação máxima da vazão mássica por área de abertura do coletor dentro de um ciclo de medição de 15 min: Valor médio_(15 min) $\pm 1 \%$.

6.2.10 Resumo dos critérios para seleção de dados utilizados para uma regressão de um ensaio do tipo QDT

O ensaio em regime quase dinâmico possui menos exigências em relação à seleção das medições, fornecendo assim maior quantidade de dados para a avaliação no mesmo tempo de ensaio. As condições para a seleção das medições apresentadas pela norma EN12975, assim como as considerações dos itens 6.2.1, 6.2.2 e 6.2.4 a 6.2.8 são em seguida apresentadas de forma resumida:

- Radiação Global ($300 < G < 1100$) W/m^2 ;
- $K_{ob}(\theta) = K_{ob}(\theta_n) < \pm 2 \%$ (para meio dia do dia com $T_m = T_a \pm 3 \text{ K}$ e céu sem nuvens);
- $G_{up} = (G_{down} \pm 100) \text{ W/m}^2$;
- Velocidade do ar em cima da abertura do coletor: $v = (3 \pm 1) \text{ m/s}$;
- Estabilidade da temperatura de entrada: $T_{in} < \pm 1 \text{ K}$;
- Diferença da temperatura entre entrada e saída do coletor, $T_{out} - T_{in} > 1 \text{ K}$;
- Temperatura média do coletor em relação da temperatura ambiente; $T_m > T_a$;
- Intervalo médio de tempo de amostragem: $\tau_a = (6,0 \pm 0,1) \text{ s}$;
- Variação máxima da vazão mássica por área de abertura do coletor dentro de um ensaio completo: $60 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h} \pm 5 \%$;

- Variação máxima da vazão mássica por área de abertura do coletor dentro de um ciclo de medição de 5 min: Valor médio de 5 min \pm 1 %.

6.3 Regressão linear múltipla ou regressão multilinear

Das deduções apresentadas no apêndice 1, pg. 160, derivadas dos autores HOFFMANN & VIEIRA, 1987, sabe-se que a soma dos mínimos quadrados SS_E , também denominado de *variância do termo de perturbação* GUJARATI (2000), pode ser utilizada para ajustar os coeficientes em uma regressão. Substituindo as variáveis e os coeficientes determinados pelo modelo do coletor da equação (12), pg. 36 na equação (83), pg. 161 obtém-se a SS_E [W^2/m^4] representada pela equação que segue

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\dot{Q}_{me,i} - \sum_{j=1}^k (X_{j,i} a_j) \right)^2 \rightarrow \min \quad (33)$$

onde $\dot{Q}_{me,i}$ [W/m^2] é a média instantânea da potência térmica medida (equação 3, pg. 30) e $\dot{Q}_{mo,i}$ [W/m^2] é a média instantânea da potência calculada com o modelo do coletor. A amostra de dados obtidos de um ensaio completo é determinada por $i = (1$ a $n)$ valores instantâneos que são utilizados para a regressão. Sendo $X_{j,i} = X_{1,1}$ a $X_{k,n}$ as variáveis de regressão obtidas da medição e $a_j = a_1$ a a_k os coeficientes a serem ajustados pela regressão (verifique estes também em equação (12), pg. 36).

6.3.1 Determinação das incertezas dos coeficientes

A incerteza expandida dos coeficientes $U(a_j)$ (ISO-GUM, 2003 no seu Anexo H3) e (MONTGOMERY & RUNGER, 2003) é calculada através da variância dos coeficientes $var(a_j)$ com a equação (34) - verifique a dedução no Anexo 1 e compare também com o cálculo da incerteza de uma média (equação 127, pg.178). 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 $j = (1$ a $k)$ é o número dos coeficientes.

$$U(a_j) = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(a_j)} = \pm t_{\alpha/2, n-k} u(a_j) \quad (34)$$

Das deduções do apêndice 1, pg. 160 sabe-se que as variâncias a_1 a a_k dos coeficientes da regressão podem ser determinadas pela equação que segue

$$s^2 [[X^T][X]]^{-1} = E(\sigma^2) [[X^T][X]]^{-1} = \begin{bmatrix} \text{var}(a_1) & \text{cov}(a_1, a_2) & \cdots & \text{cov}(a_1, a_k) \\ \text{cov}(a_2, a_1) & \text{var}(a_2) & \cdots & \text{cov}(a_2, a_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(a_k, a_1) & \text{cov}(a_k, a_2) & \cdots & \text{var}(a_k) \end{bmatrix} \quad (35)$$

onde $E(\sigma^2)$ [W^2/m^4] é a *estimativa da variância residual da população*, que é calculada com a equação (36) através de n médias instantâneas e s^2 é a *variância experimental de uma regressão*, que equivale a $E(\sigma^2)$.

$$s^2 = E(\sigma^2) = \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2}{n-k} = \frac{\sum_{i=1}^n (\dot{Q}_{mo,i} - \dot{Q}_{me,i})^2}{n-k} = \frac{SS_E}{n-k} \quad (36)$$

A tabela 3 mostra os diferentes coeficientes obtidos do ensaio em regime permanente. Observa-se o baixo valor de s^2 que é obtido através da estabilidade alta das condições de contorno (principalmente da radiação solar) neste ensaio.

Tabela 3: Coeficientes de regressão a_j , desvio padrão $s_e(a_j)$, incerteza de regressão destes coeficientes $Uc(a_j)$ e coeficientes do coletor Cc para o ensaio em regime permanente

SST				
coeficientes de regressão	a_j	$s_e(a_j)$	$Uc(a_j)$	unidades
a_1	0.632	0.001	0.003	[-]
a_2	-3.411	0.137	0.276	[W / m ² K]
a_3	-0.071	0.002	0.004	[W / m ² K ²]
SST				
coeficientes do coletor	Cc	$U(Cc)$	unidades	$U(Cc)$ [%]
η_0	0.632	0.003	[-]	0.47
k_1	-3.411	0.276	[W / m ² K]	8.09
k_2	-0.071	0.004	[W / m ² K ²]	5.85
$E(\sigma^2)$	=	16.65	[W/m ²] ²	

Tabela 4: Coeficientes de regressão a_j , desvio padrão $s_e(a_j)$ incerteza de regressão $U_c(a_j)$ destes coeficientes e coeficientes do coletor C_c para o ensaio em regime quase dinâmico

QDT N° 1				
Coeficientes de regressão : $a_1 \dots a_6$		$s_e(a_k)$	$u_c(a_k)$	unidades
a_1	0.655	0.003	0.006	[-]
a_2	-0.092	0.012	0.024	[-]
a_3	0.624	0.004	0.008	[-]
a_4	-5.236	0.180	0.355	[W / m ² K]
a_5	-0.042	0.003	0.007	[W / m ² K ²]
a_6	-12.367	0.496	0.978	[kJ / m ² K]
QDT N° 1				
Coeficientes do coletor	C_c	$u(C_c)$	unidades	$u(C_c)$ %
η_{0_norm}	0.647	0.006	[-]	0.99
b_0	-0.140	0.037	[-]	-26.55
K_{0d}	0.953	0.016	[-]	1.66
k_1	-5.236	0.355	[W / m ² K]	6.79
k_2	-0.042	0.007	[W / m ² K ²]	16.07
k_3	-12.367	0.978	[kJ / m ² K]	7.91
$E(\sigma^2) =$		183,9 [W/m ²] ²		

A tabela 4 mostra os coeficientes para um ensaio em regime QDT. Observa-se a alta incerteza de b_0 com 26,55 % e o alto valor de k_2 (SST 5,85 %, QDT 16,65 %).

Tabela 5 : 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.
η_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 ² 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 ² K ²]	-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 ² K]	-	-	-13.3	-11.4	-14.5	-13.0	-13.9	-12.5	-14.9	-13.4

Na tabela 5 é possível verificar que os coeficientes k_1 e k_2 dos diferentes QDT estão sendo obtidos com intervalos diferentes dos do SST. Observa-se também a diferença nos resultados de $E(\sigma^2)$ comparando a tabela 3 com a tabela 4.

6.3.2 Determinação das incertezas de regressão

A *incerteza expandida* de uma média pode ser calculada (caso em que somente as incertezas de repetitividade são consideradas), multiplicando o *fator de abrangência* (*coeficiente t de Student*) pelo *desvio padrão da média* $\sigma(\bar{x})$ de $i = (1 \text{ a } n)$ observações individuais (equação 127, pg. 178), (ISO-GUM, 2003 e ALBERTAZZI, 2002). Em regressões, nas quais somente incertezas aleatórias da medição das variáveis são consideradas, é utilizado o mesmo método de cálculo (compare equações (116) e (117), pg. 172), com a única diferença de que o conceito *incerteza expandida* para os coeficientes (equação 116) é denominado de *incerteza dos coeficientes* pelo guia (ISO-GUM, 2003) e a *incerteza expandida* para a resposta média (equação 117) é denominado de *intervalo de confiança da resposta média CI* (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). Por representar somente incertezas aleatórias transformadas pela regressão (item 5.11.2), estas incertezas podem ser denominadas de *incertezas de regressão* $U_r(\dot{Q}_{mo,i})$ como apresentado em equação (37).

Segundo (MONTGOMERY & RUNGER, 2003) *intervalo de confiança da resposta média CI* $CI(\dot{Q}_{mo,i})$ é calculada através da raiz da variância da resposta média $\text{var}(\dot{Q}_{mo,i})$, que é o *desvio padrão da resposta média*, com a equação que segue (verifique também a dedução no apêndice 1, pg. 160).

$$CI(\dot{Q}_{mo,i}) = U_r(\dot{Q}_{mo,i}) = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(\dot{Q}_{mo,i})} = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{E(\sigma^2) \{X_0\} [[X]^T [X]]^{-1} \{X_0\}^T} \quad (37)$$

A matriz $[[X]^T [X]]^{-1}$ é calculada com a matriz $[X]$, que é determinada pelas variáveis $X_{1,i}$ a $X_{k,i}$ de uma amostra consistente de $i = (1 \text{ a } n)$ valores medidos, que são utilizados para a regressão. O vetor horizontal $\{X_0\}$ é o elemento i dos $i = (1 \text{ a } n)$ elementos ou linhas da matriz das variáveis $[X]$ (verifique a dedução no apêndice 1, pg. 160). Substituindo-se o vetor $\{X_0\}$ com os novos valores de medição, pode-se também determinar a incerteza de regressão da resposta média $U_r(\dot{Q}_{mo,i})$ para futuras amostras calculadas com a aplicação do modelo para estas novas variáveis, onde para cada valor instantâneo utiliza-se o valor de $t_{\alpha/2, n-k}$ obtido da tabela de

Student para as $i = (1 \text{ a } n)$ amostras utilizadas na regressão (verifique também a dedução no apêndice 1, pg. 160) .

6.3.3 Determinação do intervalo de predição com 95% de confiança

Para a resposta média, pode-se determinar um intervalo de predição $PI(\dot{Q}_{mo,i})$, no qual futuras respostas do modelo devem estar localizadas com a confiança $(1-\alpha) 100\% = 95\%$. Este é denominado de *intervalo de predição* e é calculado com a equação que segue

$$PI(\dot{Q}_{mo,i}) = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(\dot{Q}_{mo,i} - \dot{Q}_{me,i})} = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\sigma^2 (1 + \{X_0\} [[X]^T [X]]^{-1} \{X_0\}^T)} \quad (38)$$

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 a regressão) ou valores medidos com as medições utilizadas para a regressão. Segundo (MONTGOMERY & RUNGER, 2003), para 95% dos valores medidos o intervalo de predição é caracterizado com a equação que segue

$$\dot{Q}_{mo,i} - PI(\dot{Q}_{mo,i}) > \dot{Q}_{me,i} > \dot{Q}_{mo,i} + PI(\dot{Q}_{mo,i}) \quad (39)$$

Subtraindo a potência térmica do modelo $\dot{Q}_{mo,i}$ esta equação é transformada para a expressão que segue

$$-PI(\dot{Q}_{mo,i}) > \dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i} > PI(\dot{Q}_{mo,i}) \quad (40)$$

A mesma transformação é realizada com o intervalo de confiança que corresponde à *incerteza da resposta média* (apêndice 3, pg. 177), obtendo a expressão que segue

$$-CI(\dot{Q}_{mo,i}) > \dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i} > CI(\dot{Q}_{mo,i}) \quad (41)$$

Para o ensaio QDT1 assim como para o ensaio SST são apresentadas na figura 12 e figura 13 as diferenças entre a potência térmica medida e a estimada pelo modelo $\epsilon_i = (\dot{Q}_{me} - \dot{Q}_{mo})$, (equação 33, pg. 95). O intervalo de predição PI e o intervalo de confiança CI, nestas figuras são calculados para os valores individuais com as equações (37) e (38). As figuras visualizam os resultados obtidos de ensaios completos, aplicados às equações (40) e (41). As médias destes intervalos, de todos os ensaios, são comparadas na tabela 6 e tabela 7, página 111.

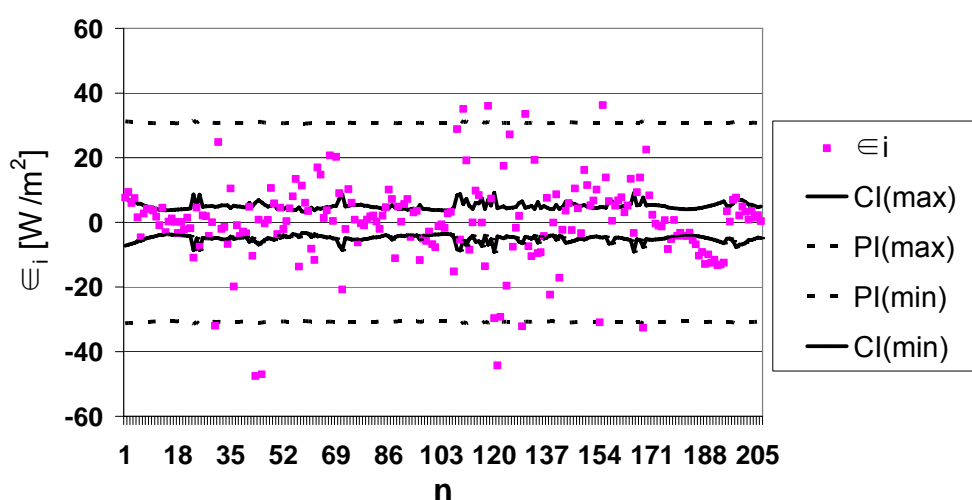


Figura 12 – Resíduos em um ensaio QDT (QDT4) - legenda: n é o número de medições, ϵ_i é a diferença entre a potência térmica medida Q_{me} e a estimada pelo modelo Q_{mo} , PI(max) e PI(min) determinam o intervalo de predição e CI(min) e CI(max) determinam o intervalo de confiança

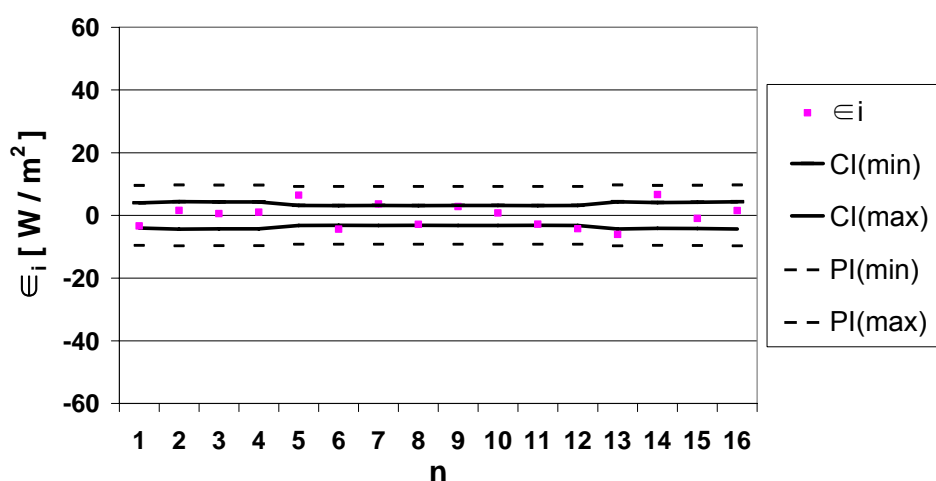


Figura 13 – Resíduos em um ensaio SST - legenda: n é o número de medições, ϵ_i é a diferença entre a potência térmica medida Q_{me} e a estimada pelo modelo Q_{mo} , PI(min) e PI(max) determinam o intervalo de predição e CI(min) e CI(max) determinam o intervalo de confiança

6.4 Regressão linear múltipla ponderada

Na regressão ponderada é colocado um peso $u^2(\epsilon_i)$ para cada *quadrado dos resíduos* ϵ_i^2 da média instantânea do tempo i que participa da regressão. Os pesos $u^2(\epsilon_i)$ são os valores quadrados das incertezas combinadas instantâneas de medição $u_{\epsilon,i}$ das medições de ϵ_i (equação 42), que são obtidas através das incertezas aleatórias dos transdutores utilizados no ensaio (equação 43). Igualmente, a *soma dos quadrados dos resíduos*, que pode ser denominada de *soma ponderada dos quadrados dos resíduos* $SS_{E,p}$ (equação 42), é minimizada, porém, neste caso, a minimização é somente possível de ser realizada através de ferramentas numéricas, variando os coeficientes de uma forma iterativa.

$$SS_{E,p} = \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\epsilon_i)^2}{u^2(\epsilon_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{(\dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i})^2}{u^2(\epsilon_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{\left(\dot{Q}_{me,i} - \sum_{j=1}^k (X_{j,i} a_j) \right)^2}{u^2(\epsilon_i)} \rightarrow \min \quad (42)$$

$$u^2(\epsilon_i) = \left(\frac{\partial(\epsilon_i)}{\partial(\dot{Q}_{me,i})} u(\dot{Q}_{me,i}) \right)^2 + \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial(\epsilon_i)}{\partial(X_{j,i})} u(X_{j,i}) \right)^2 \quad (43)$$

Por determinação do ensaio as médias $X_{1,i}$ a $X_{k,i}$ são medidas em diferentes faixas para diferentes médias instantâneas no tempo i e assim em diferentes faixas de medição dos transdutores. Como se pode ver na equação (42), em pontos (faixas de medição) onde a medição tem uma incerteza maior, o valor de $(\epsilon_i)^2 / u^2(\epsilon_i)$ se reduz porque esta incerteza está elevada ao quadrado no denominador. Isto faz com que no processo iterativo da minimização, médias com incertezas maiores entrem proporcionalmente com menos peso no ajuste da curva para a obtenção dos coeficientes.

6.4.1 Determinação das incertezas na regressão ponderada

Segundo os autores PRESS et al. (1992), as incertezas desta regressão são calculadas com a equação que segue

$$u_i = \sqrt{\text{var}(a_j)} \quad (44)$$

Este cálculo foi adotado por MATHIOULAKIS et al. (1999) e KRATZENBERG et al. (2004) para determinar as incertezas em ensaios de regime permanente e quase dinâmico.

$$[[W^T][W]]^{-1} = \begin{bmatrix} \text{Var}(a_1)^2 & \text{cov}(a_1, a_2) & \cdots & \text{cov}(a_1, a_k) \\ \text{cov}(a_2, a_1) & \text{Var}(a_2)^2 & \cdots & \text{cov}(a_2, a_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(a_k, a_1) & \text{cov}(a_k, a_2) & \cdots & \text{Var}(a_k)^2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Onde a matriz [W] é determinada pela equação que segue

$$W = \begin{pmatrix} \left\langle \frac{X_{1,1}}{u(\epsilon_1)} \right\rangle & \left\langle \frac{X_{2,1}}{u(\epsilon_1)} \right\rangle & \langle \dots \rangle & \left\langle \frac{X_{k,1}}{u(\epsilon_1)} \right\rangle \\ \left\langle \frac{X_{1,2}}{u(\epsilon_2)} \right\rangle & \left\langle \frac{X_{2,2}}{u(\epsilon_2)} \right\rangle & \langle \dots \rangle & \left\langle \frac{X_{k,2}}{u(\epsilon_2)} \right\rangle \\ \langle \dots \rangle & \langle \dots \rangle & \langle \dots \rangle & \langle \dots \rangle \\ \left\langle \frac{X_{1,n}}{u(\epsilon_n)} \right\rangle & \left\langle \frac{X_{2,n}}{u(\epsilon_n)} \right\rangle & \langle \dots \rangle & \left\langle \frac{X_{k,n}}{u(\epsilon_n)} \right\rangle \end{pmatrix} \quad (46)$$

Como se pode verificar no artigo KRATZENBERG et al. (2004), a regressão ponderada traz somente pouca vantagem em relação à regressão dos mínimos quadrados.

6.5 Comparação dos resultados dos ensaios em regime permanente (SST) com os do ensaio em regime quase dinâmico (QDT)

6.5.1 Normalização do ensaio em regime quase dinâmico para comparação com os resultados do ensaio em regime permanente

Os resultados do ensaio em regime permanente são apresentados por uma curva padronizada de eficiência (figura 3, pg. 35). Esta curva é obtida assumindo-se uma radiação global fixa de 800 W/m^2 , variando somente a temperatura ΔT na equação (47), onde $\eta_{p,SST}$ determina a função padronizada para o SST.

$$\underbrace{\eta_{p,SST}}_{\substack{\text{eficiência} \\ \text{padronizada}}} = \underbrace{\eta_0 + k_1 \frac{\overbrace{\Delta T}^{x_1}}{800 \text{ W/m}^2} + k_2 \frac{\overbrace{\Delta T^2}^{x_2}}{800 \text{ W/m}^2}}_{\text{características de perda de calor}} \quad (47)$$

Para comparar os coeficientes e as curvas padronizadas do QDT com os do SST, as condições de radiação (fração difusa $F_D = G_b/G$ e ângulo da radiação θ) do QDT devem ser normalizadas para as condições médias que aparecem em um ensaio SST. As condições dos ensaios em regime permanente permitem pouca variação para os parâmetros relacionados à radiação [fração difusa $F_D = (0 \text{ a } 0,3)$; $\theta = (0 \text{ a } 30)^\circ$ e $G = (700 \text{ a } 1100) \text{ W/m}^2$]. A norma EN12975 determina para a utilização da normalização do QDT uma fração difusa média de $F_{D-n} = 0,15$, um ângulo de incidência de $\theta_n = 15^\circ$ e uma radiação global de $G_n = 800 \text{ W/m}^2$. Com isto obtém-se a radiação difusa de $G_{d-n} = 120 \text{ W/m}^2$ e a radiação direta de $G_{b-n} = 680 \text{ W/m}^2$. Como a diferença entre SST e QDT somente consiste na composição da radiação solar diferente, é apenas necessário normalizar o coeficiente η_0 , que determina as características ópticas do coletor, já que as perdas térmicas destes dois ensaios são determinadas pelo mesmo modelo (compare a equação (9) com a equação (12) na página 33).

Para fazer a normalização do coeficiente η_0 , é preciso primeiramente normalizar o ângulo θ entre o coletor e o sol que é realizado com a equação que segue segundo a norma (EN12975, 1998).

$$K_{\theta(15^\circ)} = 1 + b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_{-n}} - 1 \right) \quad (48)$$

Em um segundo passo, o valor de η_0 é normalizado para as condições do SST pela equação (49), o que corresponde à eficiência quando o coletor não tem perdas térmicas, normalizado para as características ópticas típicas ou médias de um ensaio em regime permanente.

$$\eta_{0-QDT(SST)} = \eta_0 \left(\frac{G_b}{G} K_{\theta(15^\circ)} + \frac{G_d}{G} K_{dt} \right) \quad (49)$$

Dividindo-se a radiação solar global G nos dois lados da equação (12), pg. 36 e inserindo-se as radiações G_{-n} , G_{b-n} e G_{d-n} e o ângulo normalizado θ_{-n} na equação resultante, obtém-se a equação (50), em que as variáveis X_1 a X_3 são valores fixos e $\eta_{p,QDT(SST)}$ determina a função da eficiência padronizada do QDT, que é normalizada para as condições típicas do SST.

$$\underbrace{\eta_{p,QDT(SST)}}_{\text{eficiência padronizada}} = \underbrace{\overbrace{\eta_{0-QDT} \frac{680W/m^2}{800W/m^2} + \eta_{0-QDT} b_0 \left(\frac{1}{\cos(15^\circ)} - 1 \right) \frac{680W/m^2}{800W/m^2} + \eta_{0-QDT} K_{dt}}_{\text{propriedades óticas} \approx \eta_{0-QDT(SST)}}}_{\text{modelo para radiação direta} = K_{\theta}(\theta) \eta_0 G_b / G} \quad (50)$$

$$+ \underbrace{\overbrace{\frac{\Delta T}{800W/m^2}}^{X_4} + \overbrace{\frac{\Delta T^2}{800W/m^2}}^{X_5}}_{\text{características de perda de calor}} + \underbrace{\overbrace{\frac{\Delta T_m}{d\tau} \frac{1}{800W/m^2}}^{X_6}}_{\text{características da inércia térmica}}$$

Com ΔT_m igual a zero para desenhar a *curva da eficiência padronizada*, obtém-se a equação (51), que é comparável com $\eta_{p,SST}$ da equação (47), sendo o valor de ΔT a única variável nesta equação com a qual é variada a abscissa para traçar a curva padronizada.

$$\underbrace{\eta_{p,QDT(SST)}}_{\text{eficiência padronizada}} = \underbrace{f(a1,a2,a3)}_{\eta_{0-QDT(SST)}} + \underbrace{k_1 \frac{\Delta T^4}{800W/m^2} + k_2 \frac{\Delta T^5}{800W/m^2}}_{\text{características de perda de calor}} \quad (51)$$

6.5.2 Cálculo das incertezas de regressão das curvas padronizadas de eficiência dos ensaios QDT

Uma regressão com o modelo do coletor pode ser realizada ajustando a diferença entre energia medida e modelada (equação 42, pg. 101) ou a eficiência medida e modelada do coletor (equação 52), onde esta equação é obtida dividindo as potências térmicas da equação (42) pela radiação global em plano inclinado¹⁴ e onde $SS_{E\eta}$ é a soma dos mínimos quadrados do ajuste dessa eficiência. Para as regressões é possível calcular as incertezas da resposta média (intervalo de confiança da resposta média) com a equação (37), pg. 98 para \dot{Q} ou com equação (54) para η . Para saber a incerteza de futuros valores estimados, segundo MONTGOMERY & PECK (1992), é necessário substituir os vetores X_0 (e X_0^T) nestas equações com os futuros valores medidos e manter os valores da matriz $[X]$ assim como os valores de $E(\sigma^2)$ e $t_{\alpha/2,n-k}$ obtidos da regressão.

$$SS_{E\eta} = \sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\eta_{me,i} - \eta_{mo,i})^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta T_i \dot{m}_i C_{p,i}}{AG} - \sum_{j=1}^k (X_{j,i} a_j) \right)^2 \rightarrow \min \quad (52)$$

¹⁴ Comentário: Apesar do valor medido (η_{me}) ser determinado, com \dot{Q}_{me} / G , com uma influência de incertezas a mais (G), em várias regressões foram obtidos sempre os mesmos coeficientes, utilizando-se os dois diferentes métodos.

A eficiência modelada η_{mo-QDT} na equação (52) é obtida através da equação que segue, utilizando os coeficientes a_j , ou os parâmetros do coletor, obtidos da regressão.

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\eta_{mo-QDT}}_{\text{eficiência normalizada}} = & \underbrace{\overbrace{\eta_{0-QDT} \frac{G_b}{G}}^{a_1 \overbrace{X_1}^{X_1}} + \eta_{0-QDT} b_0 \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \frac{G_b}{G}}_{\text{potência perdida através do aumento de } \tau\alpha \text{ para ângulos de } \theta \neq 0} + \underbrace{\eta_{0-QDT} K_{oi} \frac{G_d}{G}}_{\text{modelo para a radiação difusa}} \\
 & \text{propriedades óticas } \approx \eta_{0_norm} \\
 & \text{rad. direta} \\
 & \text{modelo para radiação direta = } K \theta b(\theta) \eta_0 G_b / G \\
 & + \underbrace{k_1 \frac{\Delta T}{G}}_{\text{características de perda de calor}} + \underbrace{k_2 \frac{\Delta T^2}{G}}_{\text{características de perda de calor}} + \underbrace{k_3 \frac{dT_m}{d\tau} \frac{1}{G}}_{\text{características da inércia térmica}} \\
 & \text{características de perda de calor} \quad \text{características da inércia térmica}
 \end{aligned} \tag{53}$$

Considerando a curva padronizada da eficiência como novos valores de medição, pode-se assim calcular o intervalo de confiança (MONTGOMERY & RUNGER 2003), que corresponde à incerteza de regressão da resposta média, para estes novos valores com a equação (54). Utilizando X_1 a X_6 da equação (50) construa-se os vetores de $\{X_{i,0}\}$ e $\{X_{i,0}^T\}$, que são individuais para cada valor de ΔT . Os valores $X_{i,1}$ a $X_{i,6}$ das equações (52) e (53) com $i = (1 \text{ a } n)$ valores instantâneos, são utilizadas para a regressão de η de um ensaio QDT, estabelecendo a matriz das variáveis $[X]$. O valor de $E(\sigma_\eta)$ é obtido dessa regressão dividindo $(n-k)$ por $SS_{E\eta}$ (análogo à equação (36), pg. 95). Podem-se assim com a equação (54) calcular as incertezas de regressão para a curva padronizada de eficiência do QDT. Para não desprezar a incerteza da variável X_6 é assumido o valor máximo de X_6 do ensaio na construção dos vetores $\{X_{i,0}\}$.

$$U(\eta)_i = \pm t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(\eta_i)} = \sqrt{E(\sigma_\eta^2) \{X_{i,0}\} \left[[X]^T [X] \right]^{-1} \{X_{i,0}\}^T} \tag{54}$$

A incerteza $U(\eta)_i$ é adicionada para cada valor de ΔT na curva padronizada de eficiência. Assim, a curva padronizada, incluindo a faixa de incerteza

$\eta_{p-QDT(SST)} \pm U(\eta)$, é calculada (utilizando as equações (50) e (54)) para os valores individuais da abscissa de $\Delta T/G$ variando somente o valor de ΔT .

Na figura 14 podem-se ver os intervalos de incerteza de regressão de diferentes ensaios aplicados às curvas da eficiência padronizada (equação 50). Observa-se a baixa incerteza com os resultados obtidos do ajuste pela regressão. Também se deve destacar que mesmo que QDT1 e QDT3 sejam pouco diferentes de QDT2 e QDT4, os intervalos de incerteza de regressão destes se localizam ainda dentro das faixas de QDT2 e QDT4.

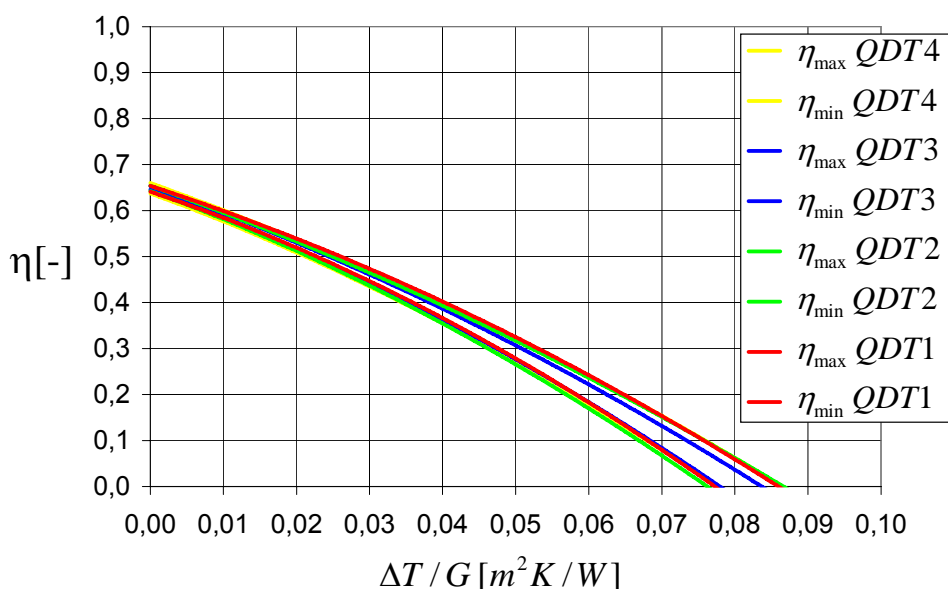


Figura 14 – Intervalo de incerteza de regressão das curvas padronizadas de eficiência – legenda: QDT1 a QDT4 são os resultados obtidos (apresentados intercaladamente) dos quatro ensaios em regime quase dinâmicos nº 1 a nº 4

6.5.3 Cálculo das incertezas de regressão das curvas padronizadas de eficiência do ensaio SST

A incerteza da *curva de eficiência padronizada* (equação 55) para o SST pode ser deduzida das incertezas dos coeficientes de regressão (equação 56) e determinada com a equação (57).

$$\underbrace{\eta_{(SST)}}_{\text{eficiência padronizada}} = \underbrace{\overbrace{\eta_{0-SST}}^{a1} + \overbrace{k_1 \frac{\Delta T}{800W/m^2}}^{a2 \times X2} + \overbrace{k_2 \frac{\Delta T^2}{800W/m^2}}^{a3 \times X3}}_{\text{características de perda de calor}} \quad (55)$$

$$U(\eta) = \sqrt{\left(\frac{\partial(\eta)}{\partial \eta_0} U(\eta_0)\right)^2 + \left(\frac{\partial(\eta)}{\partial k_1} U(k_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial(\eta)}{\partial k_2} U(k_2)\right)^2} \quad (56)$$

$$U(\eta) = \sqrt{U(\eta)^2 + \left(\frac{\Delta T U(k_1)}{G}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T^2 U(k_2)}{G}\right)^2} \quad (57)$$

Na figura 15 pode-se ver a comparação ente QDT e SST. Deve ser destacado que mesmo sendo os coeficientes de perda térmica destes ensaios diferentes, os *intervalos de confiança* dos dois são próximos para todos os valores da abscissa da curva padronizada determinada por $\Delta T/G$.

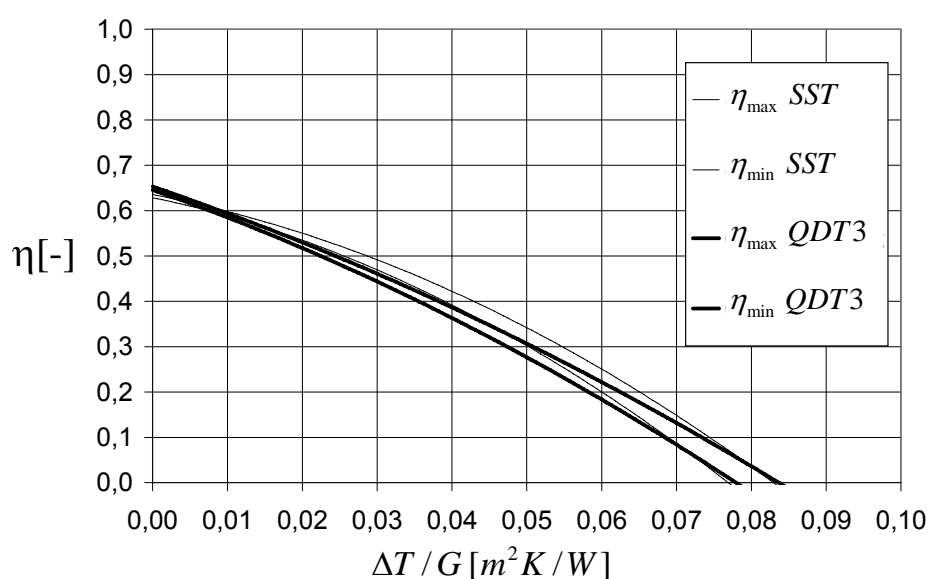


Figura 15 – Intervalo de incerteza de regressão da curva padronizada de eficiência – legenda: QDT3 são os resultados obtidos do ensaio em regime quase dinâmicos nº 3, SST são os resultados obtidos do ensaio em regime permanente

6.6 Método para obter o nível de confiança real em uma regressão

6.6.1 Nível de confiança para um ensaio

Se a medição, a amostragem das variáveis, o método de regressão e o modelo são aplicados de uma maneira correta, 95% dos valores instantâneos $\dot{Q}_{mo,i}$, calculados

com o modelo (equação 12, pg. 36), utilizando os coeficientes obtidos através da regressão, devem ser localizados nos intervalos de predição, sendo estes estimados pela equação (38), pg. 99 dentro da amostra selecionada.

É possível verificar se o intervalo de predição PI, é coerente se os n valores instantâneos médios estiverem integralmente contidos dentro dos seus limites (equação 38). Neste caso, pode-se admitir também que a *incerteza de regressão da resposta média* $U(\hat{Q}_{mo})$ estará correta, pois esta é calculada utilizando as mesmas variáveis que são utilizadas para o cálculo do intervalo de predição (compare a equação (37) com a equação (38), pg. 99). Se somente 90% das respostas do modelo se mantêm dentro do intervalo de predição, o nível de confiança real deve ser assumido somente em 90 %.

6.6.2 Nível de confiança real de ensaios do tipo QDT

Um método seguro para se determinar o nível de confiança em ensaios do tipo quase dinâmico é realizar este tipo de ensaio durante longo tempo (ex. alguns meses). A partir destas medições selecionam-se algumas amostras completas para realizar algumas regressões do tipo multilinear. Partindo do resultado de cada regressão consistente de $E(\sigma^2)$, $t_{\alpha/2, n-k}$ e da matriz $[[X]^T [X]]^{-1}$, pode-se verificar se para valores futuros de X_0 (que são todos os valores da medição durante longo tempo fora do ensaio, MONTGOMERY & RUNGER (2003)) o critério da equação (39), pg. 99 é ou não é mantido com 95 % de probabilidade. Para todos os dados obtidos pela seleção do conjunto das medições de longo tempo (que podem ser considerados como uma *quase-população*), podem-se determinar os níveis reais de confiança para um ensaio. O menor nível obtido deve ser considerado como nível de confiança para ensaios em regime quase dinâmico, assumindo-se que todas as possíveis combinações climáticas foram obtidas com o conjunto das medições de longo tempo (aproximadamente três meses).

6.7 Correção da incerteza para o intervalo de confiança de 95% para ensaios do tipo QDT

6.7.1 Correção da incerteza com estatísticas elaboradas com ferramentas numéricas

O intervalo de confiança e de predição, determinados pelas equações (37) e (38), página 99 são estimados, assumindo-se que as incertezas dos coeficientes, obtidas de uma regressão multilinear, são independentes entre si. Como este conjunto de coeficientes é obtido da mesma amostra, incluindo as mesmas medições, não se pode assumir que os coeficientes e suas incertezas, obtidos pela regressão, são plenamente independentes (MONTGOMERY & PECK, 1992). Quando se deseja obter intervalos de confiança e de predição corretos da resposta média, é portanto necessário corrigir estes intervalos. MONTGOMERY & PECK (1992) nos seus capítulos 2.6 e 4.7 documentam diferentes cálculos para intervalos simultâneos, para os coeficientes e para a resposta média obtida de uma regressão linear múltipla onde os efeitos da dependência parcial dos coeficientes são considerados. Os autores demonstram que o valor de $t_{\alpha/2, n-k}$ pode ser substituído por um novo valor maior $t_{\alpha/2, n-k, aj}$, obtido pelas tabelas da estatística de *Bonferroni t-statistic*, de *Durban-Watson* ou de *Maximum modulus t-statistic*, para a obtenção destes intervalos simultâneos. Estas tabelas ou estatísticas foram elaboradas com ferramentas numéricas nesta referencia. A estatística de *Bonferroni t-statistic*, revela um valor de $t_{\alpha/2, n-k, aj} = 2,69$ para $n = 100$ valores, $\alpha = 0,05$ e $k = 6$ coeficientes no modelo multilinear (com $n = 60$ valores revela 2,729). A estatística de *Durban-Watson* somente fornece valores de $t_{\alpha/2, n-k, aj}$ para 5 coeficientes de regressão. A estatística de *Maximum modulus t-statistic* revela um $t_{\alpha/2, n-k, aj} = 2,716$ para $n = 60$ valores, $\alpha = 0,05$ e $k = 6$ coeficientes no modelo. Com a complexidade do modelo os valores de $t_{\alpha/2, n-k, aj}$ aumentam variando assim entre 2,27 a 2,87 para 2 a 10 coeficientes para a estatística de *Bonferroni* no modelo linear múltipla. Essas estatísticas são utilizáveis em casos onde há apenas uma amostra de dados disponível.

Partindo do item 6.6.2 pode-se (em vez de utilizar as estatísticas de *Bonferroni*, *Durban-Watson* ou *Maximum modulus*) ajustar o valor de $t_{\alpha/2, n-k}$ iterativamente para que 95% dos valores de $\hat{Q}_{mo, i}$ cumpram a condição da equação (39), pg. 99,

obtendo-se assim, valores $t_{\alpha/2,n-k,aj}$ específicos para cada amostra selecionada. Na parte superior da tabela 6, são apresentados os intervalos de predição dos ensaios QDT e do ensaio SST e os níveis de confiança reais (determinados com o método do item 6.6.2, pg. 109), estimados com 941 valores médios de 5 min, onde $t_{\alpha/2,n-k}$ são os *fatores de Student* e $E(\sigma)$ são as estimadas *desvios padrão da população* (item 6.3.1 pg. 95). Os dois são obtidos através das regressões dos diferentes ensaios. Os 941 valores foram selecionados a partir dos três meses de dados medidos, aplicando os critérios das normas apresentadas pelo item 6.2.10, pg. 94 e o critério de estabilidade de vazão mássica $\pm 5\%$, especificado pelas normas ISO9806 e EN12975. Observa-se o baixo nível de confiança de 82,59% no QDT3 que é provavelmente originado pelo baixo valor de σ estimado deste ensaio.

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

Mantendo os valores originais de $t_{\alpha/2,n-k}$ podem-se substituir os valores estimadas de σ nas equações para o cálculo do intervalo de confiança e de predição (equações (37) e (38), pg. 98) com o valor de σ_c . O valor de σ_c é calculado a seguir:

$$\sigma_c = \frac{t_{\alpha/2,n-k,aj}}{t_{\alpha/2,n-k}} E(\sigma) = F_{aj} E(\sigma) \quad (58)$$

Na parte inferior da tabela 6, os valores de $E(\sigma)$ são substituídos pelo σ_c , que são aqui denominados de *variâncias residuais corrigidas*, pelo fato de estes serem

ajustados através do intervalo de predição, utilizando as 941 medições independentes, para obter a confiança superior de 95%. Apesar de ter diferentes valores de σ , os valores de σ_c são bastante estáveis nos ensaios QDT. A confiança real foi também verificada para o SST. Pelas condições climáticas do ensaio SST, que são diferentes das condições das 941 medições (QDT), observou-se o fator de 6 entre $E(\sigma)$, e σ_c (tabela 6) para o SST. Destacam-se a estabilidade dos intervalos de predição e dos valores de σ_c , ajustados nesta tabela para o QDT. A tabela 7 apresenta os intervalos de confiança, obtidos com os ajustes dos intervalos de predição, determinados na tabela 6.

Tabela 7: Intervalos de confiança médios e máximos ajustados

	Intervalo de Confiança (Incerteza Expandida)					unidades
	QDT1	QDT2	QDT3	QDT4	SST	
σ_c	15,59	15,45	16,23	15,94	24,48	W/m ²
média	4,66	6,55	5,60	6,27	18,39	W/m ²
máximo	9,65	14,64	12,18	12,79	25,76	W/m ²
Cofiança	95,11	95,06	95,20	95,15	95,22	%

Observa-se aqui que o pior valor de 14,64 W/m² para a incerteza, ou o intervalo de confiança do QDT2, é obtido com o menor valor de σ_c . O valor σ_c do ensaio SST é apenas 1,55 maior que a média de σ_c , obtida dos quatro valores de σ_c , dos ensaios QDT.

6.7.2 Correção da incerteza baseada nas observações sobre a variância residual da população corrigida

Através dos quatro valores da *variância residual da população corrigida* σ_c (tabela 6, tabela 7) para os ensaios QDT é determinada a média destes em 15,8 W/m² e o inerente desvio padrão em 0,35 W/m². Utilizando-se a equação (127), pg. 178, pode-se determinar o intervalo de incerteza de σ_c , para 99 % de confiança, baseado somente na repetitividade, obtendo-se assim $\sigma_c = (15,8 \pm 1,02)$ W/m². Caso se substitua em futuros ensaios, onde não se tenha medições independentes, os valores de σ com $\sigma_{c,QDT} = 16,82$ W/m² é possível estimar com uma confiança de (95 % \times 0,99 = 94,05%) as incertezas da resposta média destes ensaios. Para os

ensaios SST é aqui proposto de corrigir o $\sigma_{c,QDT}$ com o fator 1,55 obtendo assim $\sigma_{c,SST} = 26,35 \text{ W/m}^2$.

6.8 Exame da distribuição

As análises de incertezas aqui efetuadas consideram que as incertezas envolvidas apresentam distribuição normal. MONTGOMERY & PECK (1992) comentam que a distribuição normal é o argumento mais forte para se afirmar que o cálculo das variâncias está correto. É necessário verificar a distribuição, o que pode ser feito através dos resíduos da regressão.

6.8.1 Exame gráfico

Uma forma gráfica para verificar se a distribuição dos resíduos é normal, é construir o gráfico de escores normais (JONSON, 1994), que é denominado pelos autores MONTGOMERY & PECK (1992) e MONTGOMERY & RUNGER (2003) como gráfico de probabilidade normal, *normal probability plot*. Na abscissa deste gráfico (figura 16) são colocados os valores da *variável da distribuição normal padronizada* z_i e na ordenada os valores dos resíduos de ϵ_i (compare equação (33), pg. 95), ordenados em seqüência crescente. A variável z_i pode ser obtida pela tabela da *probabilidade cumulativa normal* $\phi(z_i)$, que determine $\phi(z_i)$ em função de z_i (MONTGOMERY & RUNGER, 2003, *Appendix A - Table II*), onde $\phi(z_i)$ é calculada com a equação que segue

$$\phi(z_i) = (i - 0.5)/n \quad ; \quad i = 1 \dots n \quad (59)$$

e onde $i = (1 \text{ a } n)$ é o número de médias utilizadas para a avaliação do ensaio.

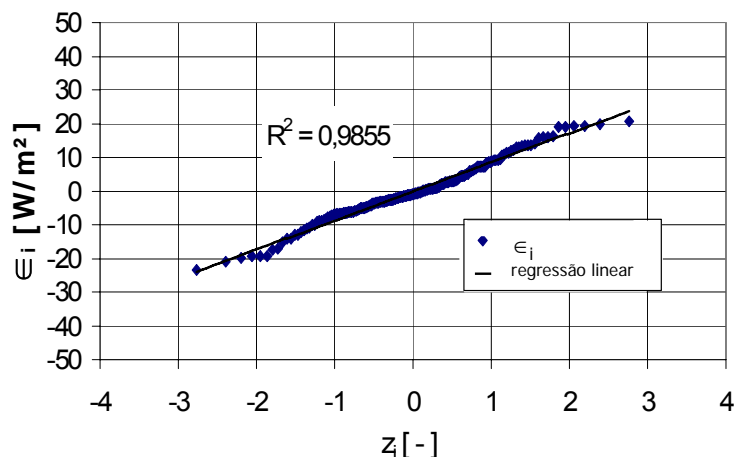


Figura 16 – Gráfico de escores normais do melhor ensaio (QDT3) - resíduos ϵ_i em função da variável z_i da distribuição normal padronizada, aproximados por uma reta com o seu coeficiente de determinação R^2

Podem-se ver na figura 17 que os resíduos de ϵ_i são pouco maiores que na figura 16. MONTGOMERY & PECK (1992) classificam com diferentes curvas as características para distribuições, (*ideal, heavy tailed, light tailed, positive skew, negative skew*). A distribuição na figura 17 pode ser classificada como *light tailed*, com efeitos muito inferiores daquilo que é considerado para esta classificação (compare MONTGOMERY & PECK, 1992).

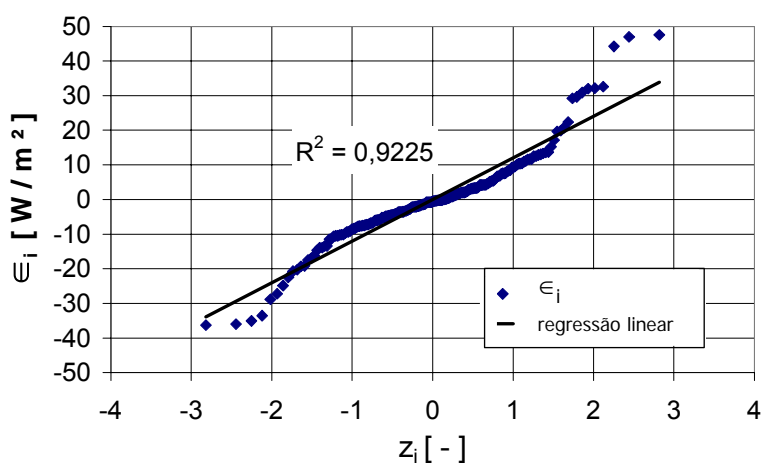


Figura 17 – Gráfico de escores normais do pior ensaio (QDT4) - resíduos ϵ_i em função da variável z_i da distribuição normal padronizada, aproximados por uma reta com o seu coeficiente de determinação R^2

6.8.2 Exame matemático

Os autores MONTGOMERY & PECK (1992) documentam um teste de distribuição normal, onde utilizam os resíduos normalizados, que são calculados com a equação que segue

$$d_i = \frac{\epsilon_i}{\sqrt{\sigma^2}} = \frac{(Q_{mo,i} - Q_{me,i})}{\sigma} \quad (60)$$

Se a função tem distribuição normal, 68 % dos valores de ϵ_i devem ser inferior ao *desvio padrão experimental*, ou 68 % dos valores de d_i devem ser inferiores ao valor de ± 1 . Igualmente, 95 % dos valores de d_i devem ser inferiores ao valor ± 2 . Os autores comentam que um desvio substancial destes limites indica potencialmente a violação da suposição da distribuição normal. Para o QDT 4 obtiveram-se resultados onde 80,6 % dos valores de d_i estão abaixo do valor de ± 1 e 92,7 % estão abaixo do valor ± 2 .

6.9 Exame dos resíduos

O autor GUJARATI (2000) recomenda, entre outros, um método simples e informal para verificar se há heteroscedasticidade^{9, pg. 60}. O método consiste em representar graficamente os valores quadrados dos resíduos ϵ_i^2 (denominados por GUJARATI *variância do termo de perturbação* ou também *variância condicional de* $(\dot{Q}_{mo} - \dot{Q}_{me})$) obtidos da regressão (equação 33, pg. 95), em função das diferentes variáveis de regressão X_i para verificar se estes valores se relacionam com uma das variáveis de regressão. Os valores de ϵ_i^2 de todos os ensaios foram representados graficamente em função das seis variáveis de regressão de cada ensaio QDT. Estes valores não se relacionaram linearmente ou em uma outra função com as variáveis, quando se compara os gráficos obtidos com os gráficos de referência apresentados por (GUJARATI, 2000, capítulo 11.5). Somente no ensaio QDT4 observou-se para a variável X_2 , abaixo de aproximadamente 150 W/m² (para apenas 30 dos 206 valores), um aumento de ϵ_i^2 (figura 18). Nas outras variáveis e em outros ensaios,

não ocorreu um aumento ou redução de ϵ_i^2 com o aumento da variável X_i . Considera-se assim homoscedasticidade^{10, pg. 60} para os resíduos dos ensaios.

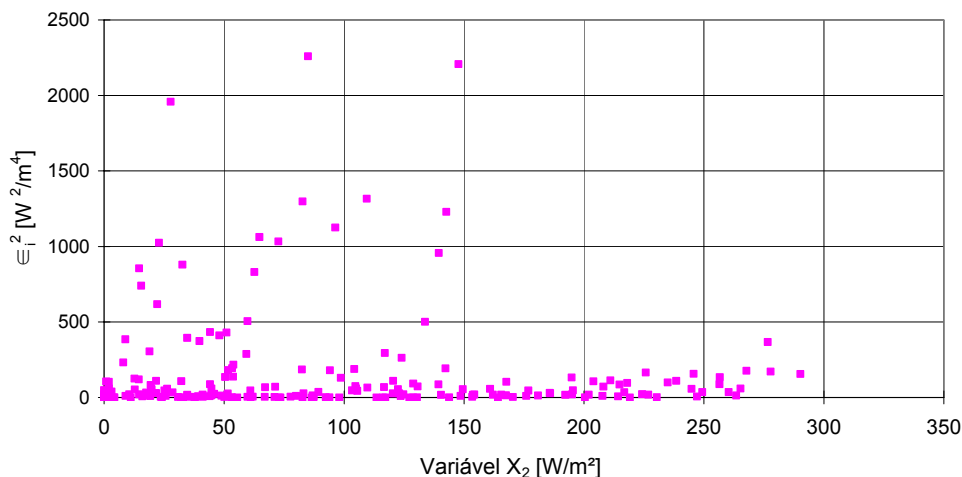


Figura 18 – Pior resultado do exame de heteroscedasticidade – legenda: variância do termo de perturbação ϵ_i^2 sobre a variável X_2 do modelo QDT4

6.10 Método para verificar a estabilidade parcial do modelo dos ensaios em regime quase dinâmico

Partindo de duas amostras A e B de dados obtidos de experimentos diferentes, é possível fazer duas regressões independentes com estas amostras e obter dois conjuntos de coeficientes com as suas respectivas incertezas. Nos casos em que os dois experimentos são do mesmo coletor, mas realizados em diferentes condições de operação e de ambiente, as regressões devem resultar em coeficientes estatisticamente similares. Os coeficientes serão considerados estatisticamente semelhantes se obedecerem a condição apresentada por CLOGG et al.(1995) na equação que segue

$$|z_j| = \frac{a_{j,A} - a_{j,B}}{\sqrt{\text{var}(a_{j,A,B})}} = \frac{a_{j,A} - a_{j,B}}{\sqrt{\text{var}(a_{j,A}) + \text{var}(a_{j,B})}} \leq z_{crit.} = z_{\alpha/2,df} \quad (61)$$

onde a_j são os coeficientes do coletor, $\text{var}(a_j)$ são as variâncias dos coeficientes e os índices A e B denominam que estes são obtidos do ensaio A ou do ensaio B. O valor de z_j é um valor de controle, obtido pelo cálculo em cada comparação de coeficientes de regressão, que deve ser inferior ao valor de z_{crit} . O valor de z_{crit} é determinado pela tabela de distribuição normal com 1,96 para $\alpha/2 = 0,025$ e $df = n_1 + n_2$ graus de liberdade.

Na tabela 8 podem-se verificar que os coeficientes dos diferentes QDT estão sendo muito similares. Somente a_4 da comparação QDT1 com QDT3 e a_6 da comparação QDT1 com QDT2 estão sendo avaliados como estatisticamente diferentes.

Pequenas diferenças na capacitância térmica não geram diferença na energia modelada com o modelo, pois é somente um pouco mais de energia absorvida e logo depois devolvida para o circuito. Deve-se destacar o baixo valor de $z_j = 2,07$ em comparação com o valor crítico de $z_{\text{crit}} = 1,96$, que indica apenas pouca diferença entre os coeficientes.

Tabela 8: Diferenças estatísticas nos coeficientes da regressão

Normal z - valores	QDT 1 comparado ao QDT 2		QDT 1 comparado ao QDT 3		QDT 1 comparado ao QDT 4		QDT 2 comparado ao QDT 3		QDT 2 comparado ao QDT 4		QDT 3 comparado ao QDT 4	
	$ z_j $	teste	$ z_j $	teste	$ z_j $	teste	$ z_j $	teste	$ z_j $	teste	$ z_j $	teste
$z(a_1)$	0.52	igual	0.79	igual	0.33	igual	0.21	igual	0.03	igual	0.19	igual
$z(a_2)$	0.92	igual	0.94	igual	0.03	igual	0.10	igual	0.75	igual	0.74	igual
$z(a_3)$	1.30	igual	1.40	igual	0.42	igual	0.26	igual	0.71	igual	0.63	igual
$z(a_4)$	1.90	igual	2.09	dif.	1.48	igual	0.23	igual	0.06	igual	0.19	igual
$z(a_5)$	1.29	igual	1.33	igual	1.25	igual	0.33	igual	0.29	igual	0.78	igual
$z(a_6)$	2.23	dif.	1.39	igual	1.30	igual	1.00	igual	0.99	igual	0.00	igual

6.11 Método para verificar a estabilidade estatística do modelo dos ensaios de coletores

O mesmo método como apresentado no item 6.10 para comparar os coeficientes é aqui utilizado para comparar as energias, utilizando-se as variâncias destas. Neste teste estatístico, são comparadas as energias que os diferentes modelos obtidos dos ensaios QDT e o SST produzem quando estes são aplicados para as 941 medições

independentes. Para a avaliação das comparações estatísticas são utilizadas as variâncias $\text{var}(\hat{Q}_{mo,i})$, calculadas com a equação (37), pg. 98, utilizando-se os resultados dos ensaios e aplicando-se estes para medições independentes que são os vetores $\{X_0\}$ das medições. As variâncias das energias $Q_{mo,i}$, baseadas nas variâncias das respostas médias instantâneas, são calculadas com a equação a seguir:

$$\text{var}(Q_{mo}) = \sum_{i=1}^n \text{var} Q_{mo,i} = \sigma^2 \Delta \tau^2 \sum_{i=1}^n \{X_{0,i}\} [X^T X]^{-1} \{X_{0,i}^T\} \quad (62)$$

Esta equação foi deduzida das equações (37), pg. 98 e (67), pg. 121. As comparações utilizando dois ensaios distintos foram aplicadas para verificar as diferenças entre diferentes ensaios QDT, assim como as entre ensaios SST e QDT com a equação que segue

$$|z| = \left| \frac{Q_{mo,A} - Q_{mo,B}}{\sqrt{\text{var}(Q_{mo,A,B})}} \right| = \left| \frac{Q_{mo,A} - Q_{mo,B}}{\sqrt{\text{var}(Q_{mo,A}) + \text{var}(Q_{mo,B})}} \right| \leq z_{crit.} = z_{\alpha/2,df} \quad (63)$$

onde Q_{mo} é a energia obtida com as medições independentes, os índices A e B indicam os dois ensaios a ser comparados (QDT ou SST). Para a avaliação é utilizado, equivalente ao item 6.10, o valor crítico de $z_{crit} = 1,96$. A tabela 9 avalia as diferenças estatísticas para a energia que os diferentes coletores produzem.

Tabela 9: Diferenças estatísticas nos coeficientes da regressão

comparação estatística de:	QDT1 QDT2	QDT1 QDT3	QDT1 QDT4	QDT2 QDT3	QDT2 QDT4	QDT3 QDT4
z	0,037	0,036	0,018	0,006	0,031	0,032
comparação estatística de:	SST QDT1	SST QDT2	SST QDT3	SST QDT4		
z	0,096	0,359	0,597	0,229		

Com o valor de z inferior ao $z_{\text{crit}} = 1,98$, os modelos obtidos dos ensaios distintos produzem resultados que são estatisticamente semelhantes. Nas comparações de diferentes ensaios QDT há mais proximidade que nas comparações dos ensaios QDT com o SST. Observação: Para o cálculo das variâncias foram utilizados valores de σ em vez de σ_c . Como σ_c é maior que σ , obtêm-se na utilização de σ_c ainda menores valores de z .

6.12 Teste para verificar se a produção da energia calculada através do modelo está correta

Os autores FISCHER & MÜLLERSTEINHAGEN (2004) apresentam um método para verificar a produção da energia com os parâmetros obtidos pelo ensaio. Uma segunda seqüência de ensaio com medições independentes da primeira, com que foram estimados os coeficientes, deve ser utilizada neste método. Deve-se verificar se a produção da energia, estimado com o modelo Q_{mo} que, por sua vez foi determinado com medições independentes, tem um desvio menor que $\pm 2\%$ em relação à energia medida com a equação que segue

$$P_1 = \frac{Q_{mo} - Q_{me}}{Q_{me}} 100\% < |\pm 2\%| \quad (64)$$

Por conseguinte, os autores propõem um teste (equação 66) em que a soma dos valores absolutos da diferença entre a potência térmica medida e a estimada pelo modelo deve ser inferior a 5%, utilizando a seqüência de medições independentes.

$$P_2 = \frac{\sum_{i=1}^n |\dot{Q}_{mo} - \dot{Q}_{me}|}{\sum_{i=1}^n Q_{me}} 100\% < 5\% \quad (65)$$

Os coeficientes obtidos do QDT4 foram utilizados como dados independentes para verificar os modelos obtidos do QDT1 a QDT3. Foram obtidos para P_1 valores de: QDT1 = 0,81%; QDT2 = -0,97% e QDT3 = 0,07%. Para P_2 obtiveram-se os valores de: QDT1 = 2,9%; QDT2 = 2,9% e QDT3 = 2,8%. Em 16 possíveis combinações dos

quatro ensaios QDT obtiveram-se para P_1 valores abaixo de $\pm 1,06 \%$ (KRATZENBERG et al 2005, *Table 6*). Caso se aplique o modelo e os coeficientes do SST para as medições independentes de QDT1 a QDT4, obtêm-se os seguintes valores para P_1 : $QDT_1 = -5,3\%$, $QDT_2 = -5,2 \%$, $QDT_3 = 3,2 \%$ e $QDT_4 = 4,4 \%$.

6.12.1 Erro de ajuste para a energia que o modelo estima com as medições dos ensaios

Aplicando a equação (64) para a amostra do próprio ensaio (dados não independentes), obtiveram-se, pelo ajuste da regressão para P_1 , valores de: $QDT_1 = -0,02\%$; $QDT_2 = -0,08\%$, $QDT_3 = -0,02\%$ e $QDT_4 = -0,01\%$.

6.12.2 Erro de ajuste para todos os dados selecionados

Aplicando a equação (64) para 941 médias independentes, especificadas no item 6.7.1, obtiveram-se as seguintes diferenças de P_1 (equação 64) entre as energias medidas e as energias estimadas pelos modelos nos ensaios: $QDT_1 = 0,58\%$, $QDT_2 = -0,59\%$, $QDT_3 = -0,51\%$ e $QDT_4 = -0,03\%$. Para o ensaio SST obteve-se $3,75\%$.

6.13 Energia estimada pelo modelo QDT

Para ensaios do tipo quase dinâmico, pode-se calcular a energia produzida em um ensaio, com a multiplicação das potências térmicas médias, estimadas com o modelo $\dot{Q}_{mo,i}$, pelo intervalo de tempo da média ($\Delta\tau_i = 5 \text{ min}$) e somando-se as energias obtidas com a equação a seguir:

$$Q_{mo} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{mo,i} \Delta\tau_i = \Delta\tau_i \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (X_{j,i} a_j) \quad (66)$$

6.14 Incertezas da energia estimada com o modelo QDT

Em seguida, é apresentado um balanço de incerteza para a energia modelada considerando condições de operação independentes do ensaio $u(Q)$ (tabela 10, pg. 132). As incertezas de regressão $u(Q_{mo})$ são calculadas com a equação a seguir:

$$u(Q_{mo}) = \Delta \tau_i \sum_{i=1}^n u(\dot{Q}_{mo,i}) \quad (67)$$

6.14.1 Cálculo das incertezas obtidas através de um modelo

O guia ISO-GUM (2003) recomenda que quando as variáveis aleatórias de entrada (não as grandezas físicas ou os mensurandos, que são supostos como invariantes) são correlacionadas, os efeitos correlacionados (índice co) e os não correlacionados (índice nc) sejam calculados pela equação a seguir

$$u_c = \sqrt{\underbrace{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u_{nc}(x_i)^2}_{nc} + 2 \underbrace{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u_{nc}(x_i) u_{nc}(x_j) r(x_i, x_j)}_{co}} \quad (68)$$

Observa-se nesta equação que a incerteza combinada u_c pode ser reduzida quando há *coeficientes de correlação* $r(x_i, x_j)$ negativos.

6.15 Incertezas aleatórias

Considerando as incertezas dos coeficientes de regressão como não correlacionadas e aplicando-as ao modelo utilizado na regressão (equação 12, pg. 36), obtém-se a equação (69), que determina as incertezas da resposta média do modelo, onde as variâncias $\text{var}(a_j)$ são obtidas pela equação (35), pg. 96.

$$u(\dot{Q}_{mo}) = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial(\dot{Q}_{mo})}{\partial a_j} u(a_j) \right]^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial(\dot{Q}_{mo})}{\partial a_j} \sqrt{\text{var}(a_j)} \right]^2} \quad (69)$$

6.15.1 Cálculo para obter a incerteza da medição da potência térmica

No ajuste pela regressão (equação 33, pg. 95) devem ser ainda consideradas as incertezas combinadas da potência térmica medida $u(\dot{Q}_{me})$ que são calculadas com a equação que segue:

$$u(\dot{Q}_{me}) = \sqrt{\left[\frac{\partial(\dot{Q}_{me})}{\partial(\dot{V})} u(\dot{V}) \right]^2 + \left[\frac{\partial(\dot{Q}_{me})}{\partial(\rho_f)} u(\rho_f) \right]^2 + \left[\frac{\partial(\dot{Q}_{me})}{\partial(C_p)} u(C_p) \right]^2 + \left[\frac{\partial(\dot{Q}_{me})}{\partial(T_{in})} u(T_{in}) \right]^2 + \left[\frac{\partial(\dot{Q}_{me})}{\partial(T_{out})} u(T_{out}) \right]^2 + \left[\frac{\partial(\dot{Q}_{me})}{\partial(A)} u(A) \right]^2} \quad (70)$$

Onde \dot{Q}_{me} é a potência térmica medida no ensaio, calculada com o segundo termo da equação (3), pg. 30. O cálculo da soma quadrada é realizado pelo balanço de incertezas (tabela 10, pg. 132).

6.15.2 Incerteza produzida através da regressão linear de um modelo não linear

Quando modelos de característica não linear (polinômio) são ajustados com uma regressão linear, como recomendado pela norma EN12975, (observe $X_4 = \Delta T$, $X_5 = \Delta T^2$ na equação (12), pg. 36 e $X_2 = \Delta T$, $X_3 = \Delta T^2$ na equação (9), pg. 33), obtêm-se incertezas adicionais segundo os autores MONTGOMERY & PECK (1992, *chapter 5.2.1*): "Na medida em que o polinômio cresce, a matriz $X'X$ fica mal condicionada, o que pode produzir incertezas consideráveis [as the order of the polynomial increases, the $X'X$ matrix becomes ill conditioned. This means that the matrix inversion calculations will be inaccurate, and considerable error may be introduced into the parameter estimates]". Porém, os autores relatam que só no uso de um polinômio de terceiro grau estas incertezas são consideráveis. As incertezas são geradas nos coeficientes pelo eventual acoplamento (ou correlação) dos diferentes submodelos de regressão.

6.15.3 Incerteza produzida através da correlação entre as variáveis de regressão

O guia ISO-GUM (2003) recomenda calcular as incertezas aleatórias correlacionadas de duas variáveis u_{co} pela equação (68), pg. 121. Pela combinação correta do conjunto de coeficientes, obtida pelo ajuste de regressão, incertezas de correlação pouco influenciam no resultado da energia que é estimado com o modelo. Os conjuntos de coeficientes obtidos de 4 diferentes ensaios, por exemplo, estimam a energia convertida Q_{mo} de ensaios QDT com uma diferença inferior a $\pm 0,08 \%$ da energia medida Q_{me} (verifique item 6.12.1 pg. 120) e inferior a $\pm 1,06 \%$, quando são aplicados às medições independentes de ensaios diferentes. Na aplicação dos coeficientes de 4 diferentes ensaios para 941 médias obtidas de 3 meses de ensaios (verifique item 6.12.2 pg. 120), obtiveram-se diferenças inferiores a $\pm 0,6 \%$. O menor intervalo de confiança médio obtido da regressão é o do QDT3 com $3,04 \text{ W/m}^2$ não ajustado e nível de confiança de $82,47\%$ ($5,60 \text{ W/m}^2$ ajustado, tabela 7, pg. 112). Na aplicação do intervalo não ajustado de $3,04 \text{ W/m}^2$ para obter o intervalo da energia produzida durante o ensaio (equação 67), obteve-se um intervalo de confiança para a energia de $\pm 1,3 \%$, que é ainda superior a maior diferença observada de $\pm 1.06 \%$ (item 6.12, pg. 119).

6.16 Incertezas sistemáticas das potências estimadas pelo modelo QDT

As incertezas sistemáticas com características não conhecidas nas medições não devem ser desprezadas. É possível que o modelo do coletor seja ajustado através da regressão, não para o valor real da radiação, mas para este incluindo as suas incertezas altas sistemáticas. Neste caso, o modelo estimaria as potências térmicas com o erro sistemático que aparece nos coeficientes de regressão.

6.16.1 Medição das radiações e modelo do coletor

A potência da radiação solar G é convertida pelo coletor em potência térmica $\dot{Q}_{mo,Gd,Gb}$ e é calculada com a equação que segue

$$\dot{Q}_{mo,Gd,Gb} = \dot{Q}_b + \dot{Q}_d = a_1 \overbrace{(G - G_d)}^{Gb} + a_2 \underbrace{\left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \overbrace{(G - G_d)}^{Gb}}_{\dot{Q}_b} + a_3 \underbrace{G_d}_{\dot{Q}_d} \quad (71)$$

onde a radiação direta G_b é convertida em potência de aquecimento \dot{Q}_b e a radiação difusa G_d em potência de aquecimento \dot{Q}_d .

6.16.2 Incertezas produzidas através de incertezas sistemáticas não corrigíveis dos piranômetros

Os piranômetros do tipo CM11 do fabricante Kipp&Zonen são os únicos transdutores que apresentam fontes de incerteza sistemáticas não desprezíveis (apêndice 4). Estas incertezas são da ordem de 3% em relação à energia diária do sol segundo o fabricante¹⁵. As incertezas das medições instantâneas destes transdutores são ainda maiores¹⁵. São apresentados balanços de incerteza de medição na tabela 13, pg. 191, para a medição da radiação global de 680 W/m², e na tabela 14, pg. 195, para a medição da radiação difusa de 120 W/m². Para não ocorrerem erros de cálculo na incerteza da energia gerada, é necessário fazer um balanço de incerteza para cada valor medido de 5 min das radiações de diferentes intensidades, utilizando as incertezas sistemáticas instantâneas absolutas e relativas¹⁵ dos piranômetros.

No balanço de incertezas (tabela 10, pg. 131), a influência dos piranômetros deve ser considerada de forma especial. As incertezas sistemáticas dos piranômetros são influenciadas por fatores comuns tais como radiação de onda longa (infravermelho), deriva temporal, temperatura ambiente, resposta de espectro, que naturalmente variam de forma espontânea durante os ensaios.

6.16.3 Incertezas produzidas através de incertezas sistemáticas dos piranômetros na medição da radiação direta

A incerteza combinada da radiação direta é calculada através de incertezas de medição da radiação global $u(G)$ e difusa $u(G_d)$ (equação 72). Algumas das

¹⁵ Anexo 1, CM Series Specifications, CM3, CM6B, CM11, CM21, CM22

incertezas sistemáticas não compensadas entre o piranômetro que mede a radiação difusa G_d e o que mede a radiação global G são aqui consideradas correlacionadas com correlação positiva e independente dos demais erros dos piranômetros. Pelo cálculo da radiação direta ($G_b = G_d - G$) obtém-se uma correlação negativa entre as duas medições. Assim, a diferença entre os dois piranômetros ($G-G_d$) não é significativamente influenciada pelas incertezas sistemáticas não compensadas de ambos (correlacionados), mas apenas pelas incertezas não correlacionadas $u(G)_{nc,a,i}$ e $u(G_d)_{nc,r,i}$. Para o cálculo de incertezas deve-se considerar somente a parcela não correlacionada para determinar a incerteza da radiação direta G_b (equação 72). As parcelas correlacionadas absolutas se auto-compensam e a parcela correlacionada com erro relativo compensa-se parcialmente (verifique o último termo nesta equação).

$$u(G_b) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u(G)_{nc,r,i})^2 + \sum_{i=1}^n (u(G_d)_{nc,r,i})^2 + \sum_{i=1}^n (u(G)_{nc,a,i})^2 + \sum_{i=1}^n (u(G_d)_{nc,a,i})^2 + \sum_{i=1}^n (u(G)_{co,r,i} - u(G_d)_{co,r,i})^2} \quad (72)$$

O índice (co,r) assinala incertezas do tipo correlacionadas relativas, (nc,a) assinala incertezas não correlacionadas absolutas, (nc,r) assinala incertezas não correlacionadas relativas entre dois piranômetros e (co,a) assinala incertezas do tipo correlacionadas absolutas, que pela compensação nos dois transdutores CM10 não aparecem na equação (72). As incertezas correlacionadas relativas são calculadas com o valor da incerteza expresso em %. As duas incertezas de *offset*, assim como a da deriva térmica, a do ângulo de instalação e a da calibração estão sendo consideradas como incertezas correlacionadas. Isto, considerando-se que os dois piranômetros ventilados e sombreados são expostos à mesma temperatura ambiente, à mesma radiação de onda longa do céu (mesma perda de temperatura dos corpos causada pela emissão da radiação de onda longa pelos domos montados nestes), foram calibrados utilizando o mesmo padrão e montadas nos mesmos ângulos de inclinação. Depois que a incerteza sistemática $u(G_b)$ (equação (72), pg. 125) é calculada para as médias de 5 min da radiação direta G_b , é calculada a incerteza do modelo $u(\dot{Q}_{mo,G_b})$, provocado pela incerteza $u(G_b)$, aplicando o método apresentado pelo primeiro termo da equação (68), pg. 121 com a

definição do modelo do coletor (equação (12), pg. 36 ou equação (71)), obtendo assim a expressão que segue:

$$u^2(\dot{Q}_{mo,Gb}) = \left[\frac{\partial \dot{Q}_{mo}}{\partial G_b} u(G_b) \right]^2 = \left[a_1 + a_2 \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \right]^2 u^2(G_b) \quad (73)$$

6.16.4 Incertezas sistemáticas dos piranômetros na medição da radiação difusa

Para calcular as incertezas de medição da radiação difusa $u(G_d)$, que aparece no termo X_3 da equação (12), página 36, devem-se considerar todas as incertezas desse transdutor, as incertezas correlacionadas e as não correlacionadas, calculando assim com a equação que segue essa incerteza.

$$u(G_d) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u(G_d)_{co,r,i})^2 + \sum_{i=1}^n (u(G_d)_{nc,r,i})^2 + \sum_{i=1}^n (u(G_d)_{co,a,i})^2 + \sum_{i=1}^n (u(G_d)_{nc,a,i})^2} \quad (74)$$

Para as médias de 5 min da radiação difusa G_d é calculada a incerteza do modelo provocada pela medição da radiação difusa $u(\dot{Q}_{mo,Gd})$, aplicando o método da equação (68) com a utilização incertezas $u(G_d)$ e das potências térmicas \dot{Q}_{mo} (equação(71) ou equação (12), pg. 36) obtendo equação que segue

$$u^2(\dot{Q}_{mo,Gd}) = \left(\left[\frac{\partial \dot{Q}_{mo}}{\partial (G_d)} \right] u(G_d) \right)^2 = a_3^2 u^2(G_d) \quad (75)$$

6.16.5 Incertezas de correlação entre a radiação difusa e a radiação direta

Obtendo a radiação direta G_b com as suas incertezas $u(G_b)$, baseadas nas incertezas correlacionadas e não correlacionadas das incertezas sistemáticas $u(G_d)$ e $u(G)$ (equação 72), é ainda necessário considerar a incerteza obtida pelas correlação entre $u(G_b)$ e $u(G_d)$, para se estimar as incertezas de correlação destas

grandezas para a equação (71). Utilizando o segundo termo da equação (68), pg. 121, obtém-se a equação a seguir:

$$u_{co}^2(\dot{Q}_{mo,Gb,Gd}) = 2 \frac{\partial \dot{Q}_{mo}}{\partial(G_b)} u(G_b) \frac{\partial \dot{Q}_{mo}}{\partial(G_d)} u(G_d) r(G_b, G_d) \quad (76)$$

Onde $u_{co}^2(\dot{Q}_{mo,Gb,Gd})$ [W^2/m^4] é a incerteza padrão ao quadrado (variância) para a correlação entre G_b e G_d , decorrente da correlação das incertezas sistemáticas destas duas grandezas. Devido ao coeficiente de correlação, esse termo pode ser negativo ou positivo.

Derivando assim a equação (71) para calcular o termo $u_{co}^2(\dot{Q}_{mo,Gb,Gd})$, obtém-se a equação que segue

$$u_{co}^2(\dot{Q}_{mo,Gb,Gd}) = 2a_3 \left[a_1 + a_2 \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \right] u(G_b) u(G_d) r(G_b, G_d) \quad (77)$$

Onde $r(G_b, G_d)$ é o coeficiente de correlação entre as incertezas $u(\dot{Q}_{mo,Gd})$ (equação 75) e $u(\dot{Q}_{mo,Gb})$ (equação 73).

6.16.6 Combinação das incertezas das radiações solares

Combinando as partes correlacionadas e não correlacionadas das incertezas, como definido pelo guia ISO-GUM (2003) (equação 68, pg. 121), obtém-se a equação a seguir:

$$u_i(\dot{Q}_{RAD}) = \sqrt{u_i^2(\dot{Q}_{mo,Gb}) + u_i^2(\dot{Q}_{mo,Gd}) + u_{co,i}^2(\dot{Q}_{mo,Gb,Gd})} \quad (78)$$

Em que os três componentes de incerteza (expressas em W^2/m^4) são calculados com as equações (73), (75) e (77).

6.17 Incerteza expandida da energia estimada pelo modelo QDT

Considerando as incertezas sistemáticas não corrigíveis do item 6.16 como incertezas aleatórias, como o guia ISO-GUM (2003) recomenda, podem-se combinar estas com as incertezas aleatórias, obtidas dos itens 6.15, utilizando um balanço de incertezas (tabela 10, pg. 132).

6.17.1 Memorial para o balanço de incertezas da energia produzida para um ensaio do tipo QDT

As incertezas das potências térmicas [W/m^2] são utilizadas para calcular a incerteza da energia do ensaio [Wh/m^2] (compare equação (67), pg. 121). Com o balanço de incerteza (tabela 10, pg. 132) é assim obtida a incerteza combinada $u(Q_{mo})$ e expandida $U(Q_{mo})$ (ISO-GUM, 2003) da energia calculada com o modelo QDT4, utilizando as medições independentes, onde todos os efeitos de incertezas (aleatórios e sistemáticos) que podem aparecer em um ensaio de coletores QDT são considerados.

Incerteza de regressão (IR)

1.) Utilizando as incertezas dos coeficientes de regressão, pode-se calcular a incerteza das potências térmicas e energias, utilizando as equações (69) e (67), pg. 121. As incertezas dos submodelos são assim estimadas em: $U(Q,a_1) = 61,35 Wh/m^2$; $U(Q,a_2) = 43,09 Wh/m^2$, $U(Q,a_3) = 58,27 Wh/m^2$, $U(Q,a_4) = 169,24 Wh/m^2$, $U(Q,a_5) = 148,48 Wh/m^2$, $U(Q,a_6) = 18,15 Wh/m^2$. Caso em que as incertezas de correlação não são consideradas, obtém-se uma incerteza combinada da resposta média de $245 Wh/m^2$, baseada no cálculo da equação (69), página 121.

2.) Estimando-se a incerteza para medições independentes (item 6.7), obtém-se uma incerteza de regressão de $251,49 Wh/m^2$, utilizando o nível de confiança ajustado para 95 % e medições independentes com $\sigma_c = 17 W/m^2$ (item 6.7.2). Na tabela 10, pg. 132 utiliza-se como divisor o fator de abrangência da regressão $t_{\alpha/2,n-k}$, obtido com $(n-k)$ graus de liberdade na regressão (equação 33, pg. 95), utilizando $n = 206$ valores médios e $k = 6$ coeficientes.

Observação: Esta incerteza inclui todos os efeitos (incertezas aleatórias correlacionadas e não correlacionadas dos coeficientes de regressão).

Temperatura de entrada (T_{in}), temperatura de saída (T_{out}), vazão volumétrica (VM)

Estas incertezas são obtidas através das medições com os 2 transdutores do tipo PT100 e o transdutor de vazão magnético. Através dos balanços de incerteza no apêndice 4 obteve-se ($\pm 0,0102$) K como incerteza expandida para os transdutores de temperatura na faixa de (10 a 80)°C (tabela 16, pg. 201) e de ($\pm 0,476$) l/h como incerteza expandida do transdutor de vazão para uma vazão de 50 l/h (tabela 17, pg. 206), correspondendo a ($\pm 0,95$) % de incertezas. Relaciona-se os ($\pm 0,95$)% à vazão média de 81,75 l/h, obtida do ensaio QDT4, obtém-se assim a incerteza de ($\pm 0,777$) l/h. As incertezas têm infinitos graus de liberdade e fatores de abrangência de 2 (tabela 16 e tabela 17). Utilizando equação (70), pg. 122 obtêm-se as incertezas das potências térmicas médias de 5 min, que substituem as potências térmicas do modelo na equação (67), pg. 121, para calcular a incerteza da energia medida $u(Q_{me})$ do ensaio. Para cada um dos transdutores de temperatura obteve-se uma incerteza de 84,36 Wh/m² e para o medidor de vazão 27,84 Wh/m².

Massa específica (ME)

A vazão mássica é calculada através da massa específica do fluido e da vazão volumétrica (equação 3, pg. 30). A massa específica da água ρ_f é uma função da temperatura desta. No ensaio foi utilizado um polinômio para calcular o valor de ρ_f . Entre os valores tabelados na norma ISO9806 e valores calculados com o polinômio observaram-se diferenças máximas de $\pm 0,05$ kg/m³. Utilizam-se as equações (70) e (67), pg. 121, para se obter a incerteza da energia do ensaio de 1,34 Wh/m². Escolha se distribuição uniforme e infinitos graus de liberdade obtendo um divisor de $\sqrt{3}$.

Calor específico da água (CA)

O calor específico da água é uma função da temperatura desta. No ensaio foi utilizado um polinômio para calcular o valor de c_p . Entre os valores tabelados na norma ISO9806 e os valores calculados com um polinômio, foram observadas

diferenças máximas de $\Delta_{cp} = \pm 0,00043 \text{ J}/(\text{kg K})$. Utilizam-se as equações (70) e (67), pg. 121, para se obter a incerteza da energia do ensaio de $1,69 \text{ Wh}/\text{m}^2$. Escolhe-se distribuição uniforme e infinitos graus de liberdade, obtendo-se um divisor de $\sqrt{3}$.

Área do coletor (AC)

A área de abertura $A \text{ [m}^2\text{]}$ foi determinada com a medição do comprimento e da largura desta com uma régua de aço inox com uma resolução de 0,5 mm. Aqui foi considerada uma incerteza expandida de 1 mm desta régua. Como o comprimento e a largura da área de abertura foram medidos com a mesma régua, devem-se considerar as incertezas dependentes e, portanto, devem ser calculadas com a equação que segue (ALBERTAZZI, 2002).

$$u(A) = \frac{\partial A}{\partial L} u(L) + \frac{\partial A}{\partial C} u(C) = u(C) L + u(L) C \quad (79)$$

Utilizam-se equação (70) para se obter as potências térmicas e equação (67) para se obter a incerteza da energia do ensaio.

Incertezas sistemáticas originadas pelos piranômetros

- Medição da radiação direta:

A medição da radiação direta G_b é obtida calculando a diferença entre radiação difusa G_d e radiação global G . Balanços de incertezas das radiações G_d e G , como são exemplificativamente apresentados no apêndice 4, foram elaborados para cada valor médio das 206 médias do ensaio QDT4. A incerteza de medição da radiação direta $U(G_b)$ leva em conta as correlações das incertezas sistemáticas das medições de G e G_d , utilizando a equação (72), pg. 125. Com as 206 incertezas obtidas de $U(G_b)$ de (26 a 58) W/m^2 são calculadas as influências de $U(G_b)$ para o modelo do coletor. Utilizando a equação (73), pg. 126, obtêm-se incertezas do modelo $U(\dot{Q}_{mo,Gb})$ de (19 a 38,2) W/m^2 .

- Medição da radiação difusa:

Com a equação (74), pg. 126 são calculadas as incertezas da medição da radiação difusa para as 206 médias do QDT4, obtendo $U(G_d)$ de (28 a 42) W/m^2 . Com estas incertezas são calculadas as influencias para o modelo do coletor, com a equação (75), pg. 126, obtendo-se incertezas de $U(\dot{Q}_{mo,Gd})$ de (17 a 26) W/m^2 .

- Correlação entre a radiação difusa e a radiação direta:

Tendo as incertezas não correlacionadas de $U(G_d)$ e $U(G_b)$ acima calculadas e o coeficiente de correlação r_{G_b,G_d} , pode-se calcular a incerteza provocada pela correlação destas duas radiações utilizando a equação (77), pg. 127. O coeficiente de correlação ($r_{G_b,G_d} = -0,566$) é obtido com a correlação das incertezas da radiação direta e da radiação difusa que, por sua vez, são obtidas dos balanços de incertezas de G_d e G (equação 72, pg. 125) e das incertezas de G_b (equação 74, pg. 125), calculadas para as médias de 5min do ensaio. Para as 206 médias, obtém-se a influencia de correlação de $u_{co}^2(\dot{Q}_{mo,G_b,G_d})$ de (-158 a -341) W^2/m^4 .

Apresentação das incertezas de radiação no balanço de incertezas:

A equação (78), pg. 127 foi aplicada para cada média dos 206 valores medidos e obtiveram-se incertezas entre (24,0 e 38,5) W/m^2 . Utilizou-se a equação (67), para obter a incerteza da energia do ensaio. Com infinitos graus de liberdade e distribuição normal, obtida do balanço de incertezas, obtém-se o fator de abrangência 2 (ISO-GUM, 2003).

6.17.2 Balanço de incertezas da energia produzida para um ensaio do tipo QDT

Neste balanço as incertezas sistemáticas dos piranômetros e as incertezas aleatórias do ensaio (da medição da potência e da regressão) são combinadas.

O valor da incerteza expandida com 694,22 Wh (tabela 10) corresponde a 12,72 % da energia produzida pelo coletor (5459 Wh) durante o ensaio. Observa-se que as incertezas dominantes são as incertezas sistemáticas das radiações solares. Comparando-se ($u_i = u_1^2$ a u_n^2), onde u_i é a incerteza padrão dos diferentes fontes de

incerteza, com a *soma quadrada* u_c^2 (equação 125, pg. 178) da tabela 10, nota-se que o u_i^2 originada pela medição das radiações solares, corresponde a 91 % de u_c^2 . Comentário: Como o fabricante especifica incertezas diárias, baseadas em experiências, com valores inferiores a $\pm 3\%$ (anexo 1) para os piranômetros CM11, é provável, que a incerteza sistemática dos piranômetros (5 % na tabela 13, pg. 191 e 23,75 % na tabela 14, pg. 195) seja ainda superestimada.

Tabela 10: Balanço de incerteza de energia $U(Q_{mo})$ para o QDT 4

fontes de incertezas		Efeitos aleatórios e sistemáticos				
símbolo	descrição	valor bruto [Wh/m ²]	tipo de distribuição	divisor	u [Wh/m ²]	v
	<u>Ajuste do modelo pela regressão</u>					
IR	Eficiência sem perdas termicas	251,49	normal	1,97	127,54	200
	<u>Medição da potência</u>					
T _{in}	Temperatura de entrada	84,36	normal	2,00	42,18	∞
T _{out}	Temperatura de saída	84,36	normal	2,00	42,18	∞
VM	Medidor de vazão	27,84	normal	2,00	13,92	∞
AC	Área do coletor	1,66	uniforme	1,73	0,96	∞
CA	Calor específico da água	1,69	uniforme	1,73	0,98	∞
	<u>Incertezas sistemáticos dos piranômetros</u>					
SIS	Incertezas sistemáticos de G _b G _d , G e a correlação entre estes	549,00	uniforme	1,73	316,97	∞
C_c	Correção combinada					
u_c	Incerteza padrão combinada		normal		347,11	∞
U	Incerteza expandida (95%)		normal		694,22	

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Discussão sobre os resultados dos ensaios QDT

7.1.1 Semelhanças entre os coeficientes de vários ensaios QDT

Através da equação (61), pg. 116, sabe-se que com maiores variâncias ou incertezas dos coeficientes de regressão obtém-se um menor valor crítico z_{crit} , que converge com a semelhança dos coeficientes. Utilizando-se os coeficientes de regressão e as suas incertezas, obtidos para verificar se os coeficientes são estatisticamente semelhantes, obtiveram-se, apesar das baixas incertezas em trinta e seis comparações, somente duas comparações com poucas diferenças (tabela 8, pg. 117 - $z(a_4)$ e $z(a_6)$), para os coeficientes k_1 e k_3 (equação 12, pg. 36).

Observaram-se, com o coletor utilizado, dificuldades para se obter medições com altas temperaturas de operação ($T_m = T_a + 60$ K) e obtiveram-se, em decorrência disto, diferenças estatísticas nos coeficientes de k_1 e k_2 para um dos QDT (KRATZENBERG et al, 2005, *table 5*). Com poucos dados nesta faixa de temperatura observou-se um efeito de extrapolação na curva padronizada de eficiência do coletor. Ao se incluir, na amostra utilizada para a regressão, mais dados de medição, obtidos nesta alta temperatura, a diferença estatística desapareceu (tabela 8, pg. 117). Constatou-se que a norma EN12975 não especifica claramente quantos dados devem aparecer em cada faixa de ΔT , somente determina através de um gráfico de $\Delta T = f(G)$ o aparecimento de pontos de medição em um ensaio QDT.

Observação: Os valores críticos de $z(a_j)$ das primeiras duas colunas da tabela 8, pg. 117 (ensaio QDT1 comparando ao QDT2 e QDT1 comparado ao QDT3) são os maiores. Nas comparações nestas colunas, o QDT1 está sempre envolvido, podendo-se concluir que este é o ensaio que apresenta a maior diferença quando é comparado com os outros ensaios.

7.1.2 Diferença entre as curvas padronizadas de eficiência, obtidas por diferentes QDT

No presente trabalho, obteve-se, para a comparação de 4 diferentes ensaios QDT (item 6.5.1), diferenças inferiores a $\Delta\eta = \pm 0,01$ na curva padronizada do QDT, que é normalizada para as condições do SST.

7.1.3 Intervalos de incertezas das curvas padronizadas

Considerando-se somente as incertezas de regressão dos 4 ensaios QDT de $U(\eta) = \pm (0,01 \text{ a } 0,03)$ na figura 14, pg. 107, conclui-se que as diferenças observadas inferiores a $\Delta\eta = \pm 0,01$ (item 7.1.2) podem ser justificadas com estes intervalos de incerteza, sem levar em conta as incertezas sistemáticas da medição das radiações solares ou das incertezas de correlação dos coeficientes de regressão.

7.1.4 Comparação dos resultados do QDT de diferentes laboratórios

O coletor utilizado passou por um QDT no ITW (*Institut für Wärmetechnik*) da Universidade de Stuttgart no ano de 2002 (dados no Anexo 2, na planilha de resultados do certificado deste ensaio). O coeficiente de $\eta_{0\text{-QDT(SST)}}$ medido tem um valor de aproximadamente 8,7 % maior nesse laboratório. Uma possibilidade de se explicar esta diferença é a utilização de diferentes piranômetros (tabela 10, pg. 132). Por parte pode ser explicado através do coeficiente para a radiação difusa $K_{\theta d}$, que tem um valor aproximado de 6,2 % inferior quando medido por esse laboratório. A diferença nos resultados poderia ser originada também na medição da potência térmica, onde estão envolvidas as grandezas vazão e temperatura. São observadas semelhanças para os coeficientes k_1 , k_2 , k_3 e b_0 , quando se compara os resultados deste ensaio com os da tabela 5, pg. 97.

Deve ser ressaltado que o certificado de Stuttgart não é acompanhado por informações de rastreabilidade dos transdutores utilizados na medição.

Outra explicação pode ser a degradação da tinta seletiva do coletor. No estado-da-arte, são utilizados processos químicos para a deposição de uma camada de níquel preto ou de outros materiais. Informações sobre a degradação da tinta seletiva, por hora, não estão disponíveis.

7.1.5 Incertezas dos coeficientes de regressão no QDT

No artigo KRATZENBERG et al. (2003), foram calculadas as incertezas dos coeficientes, baseadas nos resultados do ensaio realizado pelo ITW (*Institut für Wärmetechnik* da Universidade de Stuttgart). Observou-se que o coeficiente b_0 tem a incerteza de 10,6 %. Nos ensaios no LABSOLAR, esta incerteza varia de 15% (QDT2 e QDT3), a 27% (QDT1 e QDT4). No LABSOLAR obtiveram-se incertezas inferiores nos coeficientes $\eta_{0-QDT(SST)}$, $K\theta d$, k_1 e k_2 . Foi encontrada uma diferença significativa entre a incerteza do termo quadrático da perda térmica $U(k_2)$ de 11,6% para QDT4, no LABSOLAR, e de 28,06% no ensaio do ITW. Esta incerteza no LABSOLAR varia entre 16,07% para QDT1, 27,6% para QDT2, 24,5% para QDT3 e 11,6% para QDT4. As incertezas do coeficiente k_3 são semelhantes com 7,9% no ITW e 7,8% (valor máximo) no LABSOLAR.

7.1.6 Capacitância térmica obtida do QDT

KRATZENBERG et al.(2004) observam que a capacitância térmica do coletor possui um valor duvidoso, com incertezas elevadas. Os dados utilizados para a elaboração deste artigo foram obtidos das medições do QDT realizado pelo ITW. No entanto, os outros coeficientes do ensaio no ITW (Anexo 2) se localizam dentro do intervalo de incerteza expandida apresentado pelo artigo. Para a elaboração deste artigo, os dados foram selecionados com a especificação $\Delta\tau/\Delta T_m$ onde $\Delta\tau = 5$ min e $\Delta T_m = T_{m,n} - T_{m,n-1}$, onde se tem entre n e $n-1$ o período de $\Delta\tau$. O cálculo correto de $\Delta\tau/\Delta T_m$ para $i = 1$ a 50 valores é apresentado pela variável X_6 na equação (16), página 54. A norma EN12975 não documenta explicitamente este cálculo. Assim, fica como sugestão, para a atualização da norma, especificar mais claramente o cálculo.

7.1.7 Exame dos resíduos dos diferentes QDT

Nos itens 6.8 e 6.9 foram examinados os resíduos ϵ_i . O ensaio QDT4 tem a sua distribuição mais distante da normal e apresentou os maiores efeitos de heteroscedasticidade⁹, pg. 60. Portanto, o teste do nível de confiança (tabela 6, pg. 111) destacou o ensaio QDT3 como o de menor nível de confiança (82,47%).

7.1.8 Teste de distribuição e nível de confiança

No exame da distribuição (item 6.8), o QDT3 se destaca como o ensaio que tem menor amplitude dos resíduos e onde a distribuição dos resíduos ϵ_i é melhor representada pela distribuição normal (figura 16, pg.114). Analisando as incertezas dos coeficientes k_1 , b_0 e K_{0d} e a estimação da *variância residual da população* σ^2 , observa-se que o ensaio QDT3 é o mais perfeito em relação aos outros por causa dos seus valores inferiores (tabela 5, pg. 97 e tabela 6, pg. 111). Segundo (MONTGOMERY & PECK, 1992 - *chapter 3.2.2*), a distribuição normal dos resíduos é o argumento mais forte para se estimar intervalos de confiança e de predição corretamente. Ao contrário do esperado, obteve-se na verificação do nível de confiança (tabela 6, pg. 111) a menor confiança observada, de 82%, para as medições do QDT3. Desta forma, pode se concluir que os resultados dos exames apresentados nos itens 6.8 e 6.9 não influenciam significativamente a estimação dos intervalos de predição e de confiança, assim como o nível de confiança inerente a estes intervalos. Se em futuros ensaios os exames tiverem características inferiores àquelas apresentadas nos itens 6.8 e 6.9 para o QDT4, a confiabilidade dos coeficientes e intervalos de incertezas estimados será aceitável.

Com 93,52 % obtiveram-se os melhores níveis de confiança para o QDT1.

Conclua-se que a avaliação estatística para o modelo QDT3 ainda não é habilitada para estimar corretamente os intervalos de predição e os de confiança. Isto pode decorrer da falta de medições importantes no conjunto de dados do ensaio QDT3, ou da falta de capacidade do modelo matemático do QDT.

Na figura 17, pg. 114 pode-se observar que o valor baixo de R^2 para o QDT4 é originado através de apenas alguns pontos com o resíduo ϵ_i maior, que é um outro indicador para a falta da capacidade do modelo matemático.

7.1.9 Nível de confiança observado no cálculo de incertezas

Para medições independentes, o nível de confiança, determinado pela regressão em 95% caiu para 82,47% para o QDT3 e deve ser corrigido (item 6.7.1, pg. 110). A queda é decorrente do aumento das incertezas e é originada pela falta de capacidade do modelo de interpretar medições independentes. É provável que nas

medições independentes apareçam situações que não apareceram no ensaio do QDT3.

- **Intervalos de confiança e de predição**

O QDT1 possui o maior intervalo de predição e de confiança (tabela 6 e tabela 7, pg. 111). Como também o intervalo de predição ajustado (tabela 6) é maior para o QDT1, o valor $E(\sigma)$, obtido dos ensaios QDT, é aparentemente o melhor indicador de perfeição (menores incertezas), quando os resultados destes são aplicados para medições independentes. Como o ensaio QDT1 tem também os seus coeficientes mais diferentes em relação aos outros ensaios (item 7.1.1), conclua se que o QDT1 tem relativamente aos outros ensaios os piores resultados.

- **Ajuste por tabelas estatísticas**

Quando somente um ensaio está disponível, é difícil estimar os valores de correção F_{aj} (tabela 6, pg. 111), pois isto será somente possível com as medições do próprio ensaio que não são independentes.

Com um fator de correção da estatística de *Bonferroni t-statistic*, com valor de $t_{\alpha/2, n-k, aj} = 2,69$ para $n = 100$ valores, $\alpha = 0,05$ e $k = 6$ (MONTGOMERY & PECK, 1992), pode-se corrigir a incerteza para se obter um nível de confiança de 95% para pontos individuais do QDT. É desejável ter valores de *Bonferroni* para mais medições (graus de liberdade superiores), pois se reduz como aumento de n . O ensaio QDT3 não seria ajustável com o fator de *Bonferroni*, pois obtém-se através da equação (58), pg. 111 um valor de $t_{\alpha/2, n-k, aj} = 3,64$ que é acima do fator de *Bonferroni*. Conclui-se que no QDT3 apareceram algumas condições, que têm a consequência que as incertezas não corrigidas deste ensaio são estimadas com valores menores que estes realmente são. Mesmo assim o QDT3 estima os coeficientes corretos (tabela 8, 117).

- **Cálculo do fator σ_c para se obter a confiança de 95% para o QDT**

Os valores de ajuste de *Bonferroni* são para o QDT1, QDT2 e QDT4 acima dos valores de ajuste observados. Utilizando as 941 médias independentes do ensaio (ver item 6.7.1, pg. 110), obtiveram-se fatores de ajuste σ_c muito constantes. Isto possibilitou determinar um valor máximo de σ_c (item 6.7.2) que possa ser utilizado

em futuros ensaios para estimar intervalos de confiança, ou incertezas, da resposta média para dados independentes do ensaio com 94% de confiança. Conclua-se que em ensaios QDT o ajuste das incertezas com o uso de $\sigma_c = 17 \text{ W/m}^2$ é um método melhor para obter o nível de confiança correta do que o uso do método de *Bonferroni*. É desejável se obter ainda mais medições independentes e mais ensaios para confirmar o valor máximo de $\sigma_c = 17 \text{ W/m}^2$.

7.1.10 Incerteza da energia estimada com os ensaios QDT

Na utilização da equação (67), pg. 121 para estimar a incerteza da energia convertida de 941 médias independentes de 5 min do ensaio QDT, as incertezas menores (QDT1) de $\pm 4,66 \text{ W/m}^2$ (tabela 7, pg. 112) se transformam em $\pm 1,4 \%$ da energia convertida (25,92 kWh) destas médias. Esta incerteza de regressão interpreta os desvios de (-0,59 a +0,58) % entre a energia medida e a energia obtida pela modelagem, utilizando os coeficientes obtidos dos ensaios QDT₁ a QDT₄ (item 6.12.2, pg. 120). Também no caso em que se combinam os conjuntos de coeficientes obtidos pelos ensaios QDT₁ a QDT₄ para interpretar a potência térmica medida nos ensaios QDT₁ a QDT₄, o menor intervalo de incerteza de $\pm 1,4 \%$ ainda interpreta os desvios máximos de 1,06 % (item 6.12).

Observação:

Obtiveram-se, para 2250 médias de 5 min, desvios de -(1,64 a 0,5)% ente energia estimada e medida (KRATZENBERG et.al. 2005). Estas foram selecionadas para vazões mássicas com variações inferiores a $\pm 40 \%$ (média de 82,2 kg/h, desvio padrão 17,3 kg/h). Os 941 valores independentes foram selecionados com variações mássicas inferiores a $\pm 5 \%$ (compare com as especificações para a seleção das amostras para os ensaios SST e QDT no item 6.2.4). Como a vazão mássica influencia a eficiência, conclua-se que os desvios maiores de 1,64% foram obtidos através da maior variação desta vazão.

7.1.11 Efeitos de correlação entre os coeficientes

Suponha-se, como é comentado também na norma ISO9806 e EN12975, efeitos de correlação entre os coeficientes. Estes efeitos são demonstrados com a substituição

ou a combinação dos coeficientes de regressão entre os ensaios QDT. Substitui-se, por exemplo, somente o coeficiente k_1 por um k_1 obtido de um outro ensaio, obtêm-se desvios de (0,88 a 2,92)% em vez de (-0,59 a 0,58)% na energia produzida, que superam o intervalo de incerteza de $\pm 1,4$ %. Conclui-se que através da correlação entre os coeficientes são encontradas incertezas adicionais. Para a estimação da energia total do modelo não é preciso considerar estas incertezas para o caso em que são utilizados intervalos de incertezas ajustados (item 7.1.10). Portanto na estimação da incerteza da curva de eficiência padronizada, estas incertezas necessitam ser consideradas. Isto é evidente porque, por exemplo, o aumento do coeficiente k_1 é compensado com a redução do coeficiente k_2 pela regressão, obtendo-se assim as mesmas perdas térmicas e não aparecendo assim as incertezas de correlação na energia estimada com o modelo. Portanto, na curva de eficiência padronizada, os efeitos de correlação geram incertezas pela variação dos seus gradientes e das suas curvaturas.

7.1.12 Possibilidade de reduzir as incertezas do QDT

Em um dos ensaios QDT, obtiveram-se incertezas de η_{0-QDT} , k_1 e k_2 comparáveis com as do SST. Desta forma, parece que com o QDT existe a possibilidade de se obter incertezas de regressão comparáveis com as do SST (tabela 5, pg. 97, QDT 3). Nos exames de distribuição normal e de homoscedasticidade^{10, pg. 60}, foram obtidos também os melhores resultados para o QDT3. É provável que com os atuais critérios (especificados pela norma EN12975 para a seleção das medições que são utilizadas para as avaliações de ensaios QDT) ainda existam algumas condições de contorno não representativas para serem interpretadas com o modelo do QDT. Assim são originadas incertezas superiores às estimadas com distribuições diferentes da distribuição normal (compare os valores dos resíduos, assim como as distribuições destes figura 16 e figura 17 pg.114). O conjunto de medições independentes e as medições selecionadas do QDT devem, portanto, ser analisados e comparados com as medições dos ensaios, com o objetivo de se procurar uma melhor proposta para a seleção de medições utilizadas para a avaliação de ensaios QDT.

Por outro lado, imagina-se que os intervalos de incerteza são para todos os ensaios baixos como os do QDT3. Aplicando-se os dados em condições climáticas reais e

independentes, obtêm-se assim menores níveis de confiança (tabela 6 - QDT3, pg. 111). Conclui-se, então, que existem algumas condições com probabilidade inferior, que ainda não são interpretadas pela modelagem, ou em que se obtém incertezas maiores nas variáveis de regressão que deixam os resíduos aparecerem com distribuição *não normal* (compare figura 16 com a figura 17 na pg. 114). Mas isto não interfere na estimação correta da incerteza, utilizando o método proposto no item 6.7.2.

7.1.13 Incertezas sistemáticas originadas pelos piranômetros

A maior incerteza aparente nos ensaios QDT é originada pela medição das radiações solares (tabela 10, pg. 131). A alta incerteza se obtém pela medição da radiação direta, utilizando dois transdutores. As compensações das incertezas correlacionadas (itens 6.16.3 e 6.16.4) e as considerações sobre as incertezas reduzidas, para faixas de grandezas de influência reduzidas (apêndice 4, pg. 180), não reduzem as incertezas suficientemente para se chegar aos 3 % de incertezas diárias dos piranômetros CM11, especificado pelo fabricante (anexo 1).

7.1.14 Cálculo da incerteza da conversão anual para o QDT e balanço de incertezas expandidas

Não foi observada a heteroscedasticidade^{9, pg. 60} dos resíduos em função da potência térmica \dot{Q}_{mo} do coletor nas regressões. Podem-se utilizar, portanto, de uma forma direta, as incertezas da resposta média (equação 67, pg. 121) e determinar a incerteza da energia, utilizando séries de temperatura ambiente e radiação solar independentes (TMY ou dados medidos).

Superestima-se a incerteza, utilizando nesta soma todos os dados em que aparece radiação solar. Quando a temperatura no *reservatório de água quente* é maior que a temperatura média do coletor, não há vazão em sistemas solares. O resultado da incerteza expandida do balanço de incertezas de 694,22 Wh/m² pode ser convertido em 40,44 W/m² utilizando as 206 médias do ensaio QDT4 (compare item 6.17.1). Observa-se que devem ser utilizados somente aqueles valores de incerteza expandida em um balanço anual de incertezas, onde o coletor possa converter energia, que depende dos valores da temperatura ambiente, da radiação solar e da

temperatura de operação do coletor (KRATZENBERG et al. 2003). Neste artigo os autores calculam a incerteza de regressão da conversão anual em função da temperatura média do coletor. Para um ano de medições de radiação solar e temperatura ambiente, os autores obtiveram, para altas temperaturas do coletor, por conta das exclusões de incertezas, mencionadas acima, uma redução de incertezas na curva de eficiência. Observação: Nesta simulação, foi utilizado, em lugar do TMY, um ano de medições da radiação solar e temperatura ambiente. Em lugar do modelo completo do QDT foi utilizado somente o modelo reduzido do QDT, que corresponde ao SST, com os coeficientes $\eta_{0\text{-QDT(SST)}}$, k_1 e k_2 . Para as diferentes temperaturas médias do coletor de (30, 50 e 70)°C, obtiveram-se nesta simulação (3445, 2249 e 1394) horas de operação e (958, 557 e 256)kWh de conversão de energia neste tempo.

Numa estimativa aproximada utilizam-se estas horas de operação multiplicando-as pelos 40,44 W/m² obtidos do balanço de incertezas, chegando assim a (14,5, 16,3 e 22,0)% de incertezas para a conversão anual de energia com o coletor utilizado. Para se obter resultados de incertezas que correspondam ao real funcionamento de um sistema solar, deve-se simular este ainda, utilizando um perfil de consumo padrão de água quente, um padrão TMY e a formulação matemática completa do coletor junto ao sistema de circulação, sendo este do tipo forçada ou do tipo termosifão.

7.2 Discussão sobre os resultados dos ensaios SST

7.2.1 Semelhanças entre os coeficientes de vários ensaios SST

O modelo do SST somente interpreta variações da radiação difusa de (0 a 300) W/m² utilizando o modelo da radiação global (soma da radiação difusa e direta). Variações na radiação difusa e variações no ângulo θ de $\theta_n \pm (0 \text{ a } 30)^\circ$ não são interpretadas nos ensaios SST, mas nos ensaios QDT. Considerando-se em dias distintos, com céu limpo, diferentes intensidades da radiação difusa e diferentes ângulos de θ , deve-se ainda verificar, através de vários ensaios reproduzidos do SST, se os coeficientes deste ensaio são estatisticamente comparáveis, como é o caso no QDT.

7.2.2 Intervalos da resposta média

Por causa da diferença nas condições de contorno, os intervalos de predição e de confiança baixos, obtidos da resposta do SST, não podem ser utilizados para interpretar incertezas, aplicando este modelo para condições climáticas variáveis como do QDT. Se fossem utilizados, obter-se-ia apenas 29% de confiança (tabela 6, pg. 111). Portanto, é possível ajustar estes intervalos na aplicação do modelo SST para as condições variáveis do QDT com o ajuste dos intervalos de predição e de confiança (item 6.7.2). Obteve-se assim, com um $\sigma_{c,SST} = 1,55 \cdot \sigma_{c,QDT}$, um baixo intervalo de confiança médio (incerteza da resposta média) para o SST em $U(\dot{Q}_{SST}) = \pm 18,39 \text{ W/m}^2$, que é pelo fator 3 maior que os intervalos do QDT (tabela 7, pg. 112). Em futuros ensaios SST o valor de $\sigma_{c,SST}$ pode ser utilizado para estimar as incertezas da resposta média deste ensaio.

7.2.3 Energia estimada com o SST

O cálculo de incertezas da energia estimada, utilizando o modelo SST e o aplicando em condições de operação reais (que são representadas pelas características que aparecem em ensaios QDT), não é diretamente possível como no caso do QDT. Na utilização da equação (67), pg. 121 para estimar a incerteza da energia convertida, de 941 médias de 5 min, independentes do ensaio SST, as incertezas de $\pm 18,39 \text{ W/m}^2$ se transformam em $\pm 5,56\%$ da energia convertida destas médias (25,92 kWh). Esta incerteza de regressão interpreta os desvios de 3,75% entre energia medida e energia obtida pela modelagem com o modelo SST destas médias (6.12.2, pg. 120). Também no caso em que se aplica o modelo SST para interpretar a energia térmica medida nos ensaios QDT₁ a QDT₄, o intervalo de incerteza ainda interpreta os desvios obtidos de (-5,3 a +4,4)%, (item 6.12). Suponha-se que o modelo SST reduza a sua incerteza com a utilização de mais dados independentes assim é possível estimar a energia anual com baixas incertezas. Esta redução pode ser obtida pelo aparecimento de situações climáticas não interpretáveis pelo SST, que originam resíduos positivos e negativos, sendo os dois distribuídos com mais semelhança para a quantidade de dados maiores, o que leva ao efeito de compensação. As baixas incertezas poderiam ser obtidas como resultado de futuras

pesquisas, utilizando-se uma simulação numérica (exemplo *Monte Carlo*, Press 1992).

7.3 Discussão sobre as diferenças entre ensaios QDT e SST

7.3.1 Consideração genérica sobre os diferentes ensaios

Como o modelo do QDT é uma extensão do modelo do SST, pode-se considerar o modelo QDT como o modelo de aperfeiçoamento do SST, cujos elementos ou submodelos acrescentados melhoram o modelo SST em até 5,3 %.

7.3.2 Diferença nos coeficientes de regressão

No presente trabalho, obtiveram-se diferenças entre o QDT e o SST (figura 15, pg. 108). Os coeficientes dos ensaios em regime quase dinâmico ($\eta_{0\text{-QDT(SST)}}$, k_1 e k_2) com as suas incertezas, baseados na regressão, são entre si estatisticamente comparáveis, mas distintos nos resultados de $\eta_{0\text{-SST}}$, k_1 e k_2 do SST (tabela 5, pg. 97). Isto revela que existem diferenças nos coeficientes do modelo entre SST e QDT para os diferentes modelos utilizados pelas normas EN12975 e ISO9806.

7.3.3 Diferenças nos coeficientes $\eta_{0\text{-SST}}$ e $\eta_{0\text{-QDT(SST)}}$

Os coeficientes de $\eta_{0\text{-SST}}$ do SST devem ter os mesmos resultados como os coeficientes de $\eta_{0\text{-QDT(SST)}}$ do QDT, quando estes forem normalizados para as condições do SST (item 6.5.1, pg. 103, equação (50)). Na comparação de 4 QDT com um SST foram obtidos, no presente trabalho, máximas diferenças de $\Delta\eta_0 = 0,025$, onde o QDT foi avaliado sempre com valores superiores. Na comparação de nove SST com nove QDT (FISCHER et al. 2004) foram obtidos valores de $\Delta\eta_0$ abaixo de $\pm 0,011$.

7.3.4 Diferenças nos coeficientes k_1 e k_2

Diferenças nos coeficientes de perda térmica são obtidas por causa das diferentes condições climáticas (condições de contorno) entre os dois ensaios de coletores.

FISCHER et al. (2004) apresentam as curvas do SST e do QDT que mostram bastante semelhança para um coletor com perdas muito baixas. Sabendo-se que os coeficientes de perda térmica do QDT, medido no ITW (Institut für Wärmetechnik da Universidade de Stuttgart) assim como em 4 ensaios completos no LABSOLAR, utilizando mesmo coletor, são semelhantes, o problema da diferença dos coeficientes do QDT e do SST, medido no LABSOLAR, deveria ser originada por diferenças do SST em relação ao QDT. O ensaio SST mede as perdas quadráticas ($k_2 \Delta T^2$, equação (9), pg. 33) pouco acima das do QDT (equação 12, pg. 36), (tabela 5, pg. 97), compensando este efeito com mais perdas por condução ($k_1 \Delta T$). As perdas térmicas são levemente correlacionadas, como a norma EN12975 comenta. Uma possibilidade para se explicar perdas quadráticas maiores no submodelo do SST são as radiações maiores aparecendo neste ensaio (compare itens 6.2.9 e 6.2.10). Se o coletor estiver com uma resistência térmica alta entre o absorvedor e o fluido, a temperatura entre os dois é maior para altas radiações, produzindo assim mais perdas quadráticas com maiores temperaturas do absorvedor, que são originadas através de efeitos de radiação térmica e convecção (compare Apêndice 5.1 e DUFFIE&BECKMAMM, 1991, *chapter 6*).

7.3.5 Diferença nas energias estimadas com o SST e o QDT

Apesar da diferença nos coeficientes do modelo as energias estimadas com o QDT são estatisticamente semelhantes às estimadas com o SST (item 6.11).

7.3.6 Diferença nas energias estimadas com os coeficientes k_1 e k_2

Apesar do ensaio QDT resultar em coeficientes diferentes de k_1 e k_2 , comparando-os com os obtidos do SST, assume-se pela utilização do mesmo modelo de perdas (equação (9), pg. 33 e equação (12), pg. 36), que nos balanços de energia, a energia de conversão e de perdas são as mesmas com os dois modelos. Caso em que se substitui os coeficientes k_1 e k_2 obtidos dos ensaios QDT1 a QDT4, por k_1 e k_2 obtidos do SST e aplica-se os modelos QDT1 a QDT4 nesta constelação para os 941 médias de 5 min independentes, podem-se observar que os modelos estimam a energia com um *offset* de + (4,12 a 4,42)% em relação à energia medida neste período. Conclui-se que as perdas estimadas pelo SST são aproximadamente 4,2%

inferiores às estimadas pelo QDT. Conclui-se ainda que as perdas inferiores do SST devem ser compensadas por também inferiores *energias térmicas convertidas através da radiação sem perdas térmicas* pelo inferior coeficiente de η_{0-SST} (item 7.3.3) em relação ao QDT, porque não se obteve diferenças estatísticas nas energias Q_{mo} que os diferentes modelos (SST e QDT) convertem (item 7.3.5).

7.3.7 Diferenças nas incertezas dos coeficientes de regressão

Por causa da operação do ensaio SST em condições de regime permanente, este tem incertezas dos coeficientes de regressão inferiores. Enquanto os intervalos de incerteza para os coeficientes η_0 e k_2 são comparáveis nos QDT e SST (tabela 5, pg. 97), a incerteza de k_1 é inferior no caso do SST.

Por outro lado, obtiveram-se, tanto para o ensaio QDT3 como para o SST, baixos níveis de confiança (82,47 e 29)% da resposta média, quando o intervalo das incertezas desta resposta não for ajustado (tabela 6, pg. 111), e erros altos no cálculo da energia para o SST (item 6.12, pg. 119). Portanto deve ser considerar também para os coeficientes um intervalo de incertezas superiores para o SST quando o modelo deste é aplicado para as condições reais de operação de um coletor.

7.3.8 Diferenças nas curvas padronizadas de eficiência do SST com as curvas do QDT normalizadas para condições do SST

Os autores FISCHER et al. (2004) compararam os dois diferentes ensaios e conseguiram uma boa semelhança nas curvas padronizadas de eficiência sem levar em consideração as incertezas dos resultados. Nesta comparação (de nove diferentes coletores com baixas perdas térmicas), um dos ensaios QDT resultou na curva de eficiência com valores de $\eta = (0,002 \text{ a } 0,012)$, superiores em relação ao SST. No presente trabalho obtiveram-se para uma comparação, utilizando um coletor de altas perdas térmicas, diferenças inferiores a $(\eta \pm 0,04)$, (figura 15, pg. 108). Considerando somente as incertezas de regressão, os intervalos de incerteza se superpõem ou são muito próximos nos dois diferentes ensaios nesta figura. Apesar da *incerteza da energia convertida pelo coletor* poder ser estimada sem a consideração de incertezas originadas pela correlação dos coeficientes de regressão

(item 7.1.11), para os coeficientes e para a curva padronizada de eficiência é necessário considerar tais incertezas. Também as incertezas originadas pela medição das radiações global e difusa para ângulos de $\theta = (0 \text{ a } 60)^\circ$, no caso do QDT, e as da radiação global para ângulos de $\theta = (0 \text{ a } 30)^\circ$, no caso do SST, assim como as incertezas de correlação dos coeficientes de regressão devem ser consideradas de forma igual para levantar estas curvas. Suponha-se, na inclusão destas incertezas na figura 15, pg. 108, que as duas curvas padronizadas podem ser consideradas estatisticamente semelhantes.

7.4 Conclusões obtidas através dos ensaios e dos métodos aplicados

Os ensaios e análises efetuadas ao longo deste trabalho permitiram estabelecer algumas conclusões em relação aos ensaios de coletores pelos dois caminhos (QDT e SST) avaliados.

Com os métodos propostos, é possível determinar as incertezas de regressão em ensaios, operando em regime quase dinâmico e em regime permanente. É possível calcular as incertezas da energia convertida pelo coletor anualmente (itens 7.1.14 e 7.2.3). Obtiveram-se incertezas de regressão ajustadas para a energia estimada com estes modelos de $\pm 5,56 \%$ (item 7.2.3) para o ensaio em regime permanente e de $\pm 1,4 \%$ (item 7.1.10) para o ensaio em regime quase dinâmico. As incertezas da energia, baseadas na regressão são satisfatoriamente baixas, principalmente para o QDT.

A incerteza para estimações da energia convertida anualmente pelo modelo SST é provavelmente inferior, mas isto não foi possível estimar com os métodos apresentados (item 7.2.3). A vantagem da incerteza baixa que o QDT tem é contrabalanceada com a maior incerteza na medição da radiação solar, que é originada por duas medições: a da radiação difusa e a da radiação global (5 % na tabela 13, pg. 191 e 23,75 % na tabela 14, pg. 195). Em comparação, no SST é considerada apenas a incerteza da radiação global (5 %). Tanto para os ensaios QDT como para medições independentes, as incertezas estimadas da energia, baseadas somente em incertezas (não ajustadas) de regressão, são sempre

superiores às diferenças entre a energia obtida pela modelagem e a obtida pela medição.

Os intervalos de predição e de confiança são estimados pela regressão, considerando que entre os coeficientes de regressão não há dependência. No entanto, os coeficientes obtidos de uma regressão não são independentes por serem estimados utilizando-se a mesma amostra. Porém, na resposta média, é preciso aumentar as incertezas através de métodos estatísticos como, por exemplo, o método denominado de *Bonferroni t-statistic*.

O método proposto no presente trabalho - para corrigir o intervalo de predição e de confiança pelo aumento do valor de σ para se obter 94 % de confiança – tem as seguintes vantagens:

- Estima intervalos de incertezas inferiores aos dos obtidos pelo método de *Bonferroni t-statistic*;
- Foi baseado em uma série de medições independentes do ensaio;
- Estima valores de correção σ_c , utilizados para ajustar os intervalos de incerteza das potências térmicas para medições independentes (medições desconhecidos), com 99% de confiança;
- Tem alta estabilidade do valor de σ_c ($\pm 1,02 \text{ W/m}^2$, item 6.7.2) nos ensaios QDT realizados, sendo o ajuste do intervalo de confiança muito exato.
- Pode ser utilizado para estimar o intervalo de confiança (a incerteza da resposta média) para medições independentes, com 94 % de confiança, utilizando apenas os resultados de um ensaio;
- Pode ser utilizado para estimar as incertezas do ensaio SST, aplicando o modelo deste para condições de tempo variáveis.

Com os propostos métodos, as incertezas das radiações solares são estimadas, utilizando várias suposições. Provavelmente, as incertezas das radiações solares são ainda superestimadas. Para verificar se as curvas padronizadas, do SST e do QDT são estatisticamente semelhantes, é ainda necessário incluir a incerteza correta das radiações solares e as incertezas de correlação dos coeficientes de regressão. Aplicando estas incertezas para as equações das curvas padronizadas obtêm-se as

incertezas expandidas destas curvas, com as quais é possível verificar a semelhança.

Independente desta semelhança, os dois diferentes modelos (QDT e SST) estimam a mesma energia (item 6.11) com uma diferença máxima de 4% nos cinco ensaios apresentados. Houve semelhança estatística entre os dois ensaios, porque esta diferença é interpretável pelas incertezas dos ensaios. Não é necessário utilizar incertezas de correlação dos coeficientes de regressão para aumentar as incertezas obtidas da resposta média e as da energia estimada com o coletor se o intervalo de confiança for ajustado (item 6.7.1).

Ensaio QDT representam uma boa alternativa para os ensaios SST. Apesar das desvantagens em custo, tempo de execução e cálculo de incerteza, que ensaios SST têm, estes não são completamente substituíveis pelos ensaios QDT. Isto porque o SST é executável em condições *outdoor* e *indoor* no laboratório com um simulador solar.

7.5 Conclusões em relação às normas EN12975 e ISO9806

- É sugerido, de atualizar a norma EN12975, especificando a quantidade mínima de pontos de medição requeridos para cada das quatro temperaturas de entrada do coletor nos ensaios QDT (item 7.1.1);
- A norma do ensaio QDT ainda precisa ser aperfeiçoada em relação às *condições de contorno* para selecionar as medições representativas. Mais especificamente as faixas de seleção para F_D , item 6.2.1 e para θ , item 6.2.2);
- O cálculo das variáveis das capacitâncias térmicas deve ser documentado mais explicitamente pela norma EN12975 (itens 3.7.5 e 7.1.6);
- Atualmente, o QDT não é normatizado pela norma ISO - Organização Internacional para a Normalização -, o que dificulta a implementação deste ensaio em diferentes países assim a comparação internacional dos resultados obtidos por diferentes laboratórios desta modalidade de ensaios e coletores;
- Mesmo que os exames de normalidade (item 6.8) e de homoscedasticidade (item 6.9) dos resíduos no presente trabalho não pareçam influenciar as

incertezas da resposta média, é recomendável incluir estes tipos de exames nas normas com as características máximas claramente especificadas (exemplo valores elaborados no item 6.8.2);

- É desejável que um procedimento de cálculo de incertezas dos coeficientes (item 6.3.1) e da resposta média (itens 6.3.3, 6.7.1e 6.7.2), assim como as incertezas máximas destes dois, seja especificado pelas normas. Como as propostas de cálculo no presente trabalho são fáceis de reproduzir, estes podem servir para esta extensão das normas neste sentido. As incertezas máximas devem ser embasadas nos resultados de ensaios obtidos utilizando diferentes tipos de coletores solares.
- Como os piranômetros geram, através dos seus erros sistemáticos não conhecidos, as maiores incertezas nos ensaios QDT (tabela 10, pg. 132), estes erros devem ser corrigidos, ou os piranômetros substituídos por instrumentos de padrão superior (item 7.11).
- O cálculo de incertezas expandidas apresentado na tabela 10, pg. 131 é fácil de ser acrescentado aos resultados do ensaio, uma vez que as incertezas dos piranômetros são estimadas corretamente (apêndice 4, pg. 180).

7.6 Contribuições deste trabalho

Os cálculos de incerteza apresentados no presente trabalho têm, para a qualificação dos coletores solares, dos laboratórios, que executam os ensaios, e as organizações que especificam as condições dos ensaios, importância relevada como, por exemplo: 1.) comparação dos resultados de diferentes laboratórios, utilizando o mesmo coletor e o mesmo tipo de ensaio; 2.) comparação de diferentes ensaios (QDT, SST), utilizando a mesma bancada e o mesmo coletor; 3.) comparação dos resultados entre dois coletores iguais, sendo um destes aperfeiçoado com um material ou detalhe, que promete o aumento da eficiência deste coletor; 4.) comparação de incertezas de regressão dos coeficientes do coletor com as máximas especificadas pela norma. Igualmente, os resultados de incertezas podem ser utilizados para a otimização da especificação das condições de contorno normatizadas, de ensaios com o objetivo de obter mínimas incertezas com estes (item 7.5, primeiro e segundo parágrafos).

7.7 Padrões TMY utilizados para a estimação da conversão anual de energia

Para se calcular a energia anual que um coletor produz e comparar assim diferentes coletores, são necessários anos típicos climáticos, denominado de TMY, para localidades com características climáticas diferentes. Estes anos representam padrões utilizados para a estimação da energia de um sistema solar nesta localidade. Para obter os padrões, é necessário ter médias horárias da radiação solar e da temperatura ambiente durante mais que dez anos (PETRIE & MCCLINTOCK, 1978). Em muitos países como no Brasil, estas medições ainda não estão disponíveis para os seus locais com diferentes características climáticas. Sem TMY não é possível aplicar os resultados de ensaios de coletores de uma forma padronizada para a estimação da energia que os sistemas solares produzem.

7.8 Aspectos positivos

Os resultados obtidos com presente trabalho ressaltam alguns aspectos positivos em relação a ensaios de coletores que são:

- A qualificação dos ensaios de coletores e principalmente dos ensaios em regime quase dinâmico (item 7.1.5);
- A conclusão que os resultados dos dois diferentes ensaios são compatíveis (ensaios de coletores do tipo SST e QDT fornecem modelos que calculam com semelhança estatística a energia que os coletores convertem - item 7.3.5);
- Os submodelos que estendem o modelo do SST para o modelo do QDT geram incertezas de regressão muito baixas (verifique as incertezas de energia $U(Q,a_2)$, $U(Q,a_3)$ e $U(Q,a_6)$ obtidas das incertezas de regressão dos coeficientes no item 6.17.1), donde se conclui que o QDT não aumenta significativamente as incertezas obtidas pelo SST.
- Especialmente deve-se destacar a baixa incerteza de regressão do modelo óptico do QDT, mesmo com a seleção de medições com a fração difusa de 0 a 1 (verifique os componentes dos coeficientes $U(Q,a_1)$ no item 6.17.1, pg. 128);
- A viabilização do cálculo de incertezas expandidas para o QDT.

7.9 Aspectos negativos

- Tanto o ensaio SST como o QDT não fornecem separadamente o coeficiente de transmitância τ da cobertura e o da absortância α da superfície seletiva (item 2.10);
- A resistência térmica entre o absorvedor e o fluido (figura 20, pg. 208) não pode ser obtida pelos ensaios normatizados (SST ou QDT);
- Como ainda não existe o padrão TMY em muitos países, caso do Brasil, os resultados obtidos dos ensaios SST e QDT são, atualmente, não aplicáveis à estimativa padronizada da conversão anual de energia.

7.10 Viabilidade da inclusão do balanço de incertezas nos certificados de ensaio de coletores solares

É possível executar os cálculos de incertezas, apresentados no presente trabalho, de forma automatizada através de um programa dedicado. Com isto, reduz-se o trabalho para executar o montante de cálculos de incertezas aqui apresentados. Eventuais erros grosseiros pela pessoa que executa os cálculos podem ser equivalentemente evitados. Outra vantagem é que com o programa, facilmente todos os ensaios podem ser avaliados com as incertezas que acompanharão os resultados destes.

7.11 Trabalhos futuros

- **Redução do tempo de ensaio**
Observando o fato de que o QDT é aproximadamente 10 vezes mais rápido para se executar que o SST (sem rastreador solar que posiciona o coletor sempre para o sol), uma semana ou mais, necessário para o QDT, é ainda bastante tempo para completar um ensaio. Em futuros trabalhos, pode-se ainda reduzir o tempo de execução de um ensaio QDT, aplicando uma rampa de (0 a 60) K para os dias onde T_m é diferente de T_a (compare SCNNIEDERS,

1997). Através da análise de incertezas podem ser avaliadas as novas especificações para reduzir o tempo necessário para o QDT.

- **Redução das incertezas sistemáticas dos piranômetros**

As maiores fontes de incerteza do ensaio QDT são obtidas através das incertezas sistemáticas, de característica desconhecida e portando não corrigidas, dos piranômetros. O método de calibração dos autores (FORGAN, 1995; MYERS, et al. 2002) poderia oferecer a possibilidade de se medir estes efeitos por parte e compensá-los com um modelo adequado. Sugere-se futuramente adotar este tipo de calibração na tentativa de se compensar e assim se reduzir algumas das incertezas sistemáticas (exemplos: offset, não linearidade, resposta direcional e deriva térmica) dos piranômetros.

- **Redução das incertezas da medição da radiação difusa**

Com o método apresentado pelo autor MUNEER (2002), é possível reduzir as incertezas de medição provocadas pelo *anel sombreador* (item 5.9.4).

- **Redução das incertezas da medição da radiação direta**

Uma das maiores fontes de incertezas nos ensaios é a medição da radiação solar direta. Melhorias podem ser obtidas quando se mede a radiação direta com um pirheliômetro apontado com um rastreador solar para o sol (ISO9060). Incertezas sistemáticas do tipo resposta direcional, *offset* originada pela radiação de onda longa e erro do ângulo de montagem, não aparecem neste transdutor.

- **Redução das incertezas na estimativa da conversão anual de energia**

No estado-da-arte, utilizam-se, para o cálculo estimativo da energia convertida anualmente, somente os coeficientes η_{0-SST} do SST ou $\eta_{0-QDT(SST)}$ do QDT, assim como os coeficientes k_1 e k_2 obtidos destes ensaios (Anexo2, *Test Report- page 7*). Existem modelos matemáticos que calculam médias horárias da radiação difusa e direta para superfícies inclinadas (DUFFIE & BECKMANN, 1991) através de médias horárias da radiação global (representados, por exemplo, por um TMY) incidente em superfícies

horizontais. Futuramente estas radiações poderão ser utilizadas para se calcular com menor incerteza a produção anual do coletor com a utilização dos coeficientes a_1 a a_5 do QDT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR 10184, **Coletores solares planos para líquido - Determinação do rendimento térmico**, ABNT, Brasil, 1988. 25p.

ABREU S. L. COLLE S. ALMEIDA A. P. **Determinação de um fator de correção para a radiação solar difusa medida com anel de sombreamento**, XV Congresso de Engenharia Mecânica, São Paulo, 1999, 9p.

AGILENT- Users Guide, Agilent 34970A, Data Acquisition / Switch Unit, 1997.

ALBERTAZZI A.G. **Metrologia**, Apostilha de Aula; Curso EMC 6421-Fundamentos de metrologia e estatística; Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial; Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 159p.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; ASHARE 93-86 **Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors**, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A. 1978.

BART VAN DER REE **Southern Europe - European Market Report**, Ecofys bv, NL-3526 KL Utrecht, by order of the: European Commission DG TREN, 2001. p. 81

CEN - Europäisches Komitee für Normung, DIN-EN12975-1&2 **Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile**, Entwurf: 1998; Teil 1 : Allgemeine Anforderungen; Teil 2 : **Prüfverfahren**, 1998.129p.

CEN - European Committee for Standardization, Standard EN12975-2. **Solar thermal systems and components - Solar collectors – Part 2: Test methods**. 1997.

CEN - European Committee for Standardization, KOVÁCS P. **Interlaboratory comparison on evaluation of collector test data**, Solar Keymark, 02-2003.

CEN - European committee for standardization, CEN/TC312WG - EN12975-1&2, **Amendment – List of comments**, 2003, 13p.

CEN - European committee for standardization. **Lessons learned and comments on the EN12975-1&2, AnnexWP1a.1** MÜLLER SCHÖLL CH., FREI U. Solar Keymark Interim Report 03, 2002.

CLOGG C. C., PETKOVA AND E, HARITOU A. **Statistical methods for comparing regression coefficients between models**, **Symposium on applied regression**, American Journal of Sociology, v.100, n° 5, The University of Chicago Press, U.S.A.. 1995. 1261-1293 p.

COLLE, S. & PEREIRA, E. B. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil**. Instituto Nacional de Meteorologia INMET, 1998. 57pp.

DEHNE, K. **Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula**, Report n. 15 World Meteorological Organization, Geneva, Suíça, 1984.

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.

DRUMMOND, A.J. **Comments on sky radiation and corrections** J. Appl. Meteorol., 3 p., 1964. 810-811.

EUROPEAN SOLAR THERMAL INDUSTRY FEDERATION **Sun in Action II – A Solar Thermal Strategy for Europe v.1 - Market Overview, Perspectives and Strategy for Growth**, http://energiasrenovaveis.com/docs/SiA2_Vol2_final.pdf 2003. 79p.

FISCHER S., HAHNE. **Thermische Prüfung von Sonnenkollektoren nach CEN-Norm** Veröffentlicht in der Zeitschrift Sonnenenergie und Wärmetechnik 1998.

FISCHER S., MÜLLER-STEINHAGEN H. **Validation of measurements using additional test sequences-an extension of the test procedure for solar collectors**, EuroSun2004, The 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg, Germany 2004.

FISCHER S., HEIDEMANN W., MÜLLER-STEINHAGEN S., PERERS B., BERGQUIST P., HELLSTRÖM B. **Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2**, J. Int. Solar Energy Soc. v. 76, 2004. p. 117–123.

FORGAN B.W. **A new method for calibrating reference and field pyranometer**, Journal of atmospheric and oceanic technology, v.13. 1995.

FULLER, W.A. **Measurement error models**, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A. 1987.

GILLET, W.B. AND MOON, J.E. **Solar Collectors, Test Methods and Design Guidelines**, D. Reidel Publishing Company Co, Holland 1985.

GUIGAS M., KUBLER R. AND FISCH N., **Evaluation of high performance flat plate collectors with a dynamic test method**, Proc. Erstes Symp. Thermische Solarenergie, Kloster Banz, 1991. p. 290-295.

GUJARATI D. **Basic econometrics** Mc. Graw-Hill Higher education, 2003.

HOTTEL H. C. AND WOERTZ B. B. **The performance of flat plate solar heat collectors**. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. v.64, 1942. p. 91-104.

HOFFMANN R., VIEIRA S., **Análise de regressão - uma introdução à econometria**, 2ª ed. São Paulo, Hucitec, 1987. p. 251-256.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 751, **Industrial platinum resistance thermometer sensors** Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, 1983

IFEACHOR E.C. AND JERVIS B.W. **Digital signal processing - A practical approach** Addison- Wesley Publishers Ltd. 1993.

INCROPERA F. P. AND D. P. DE WITT **Fundamentals of Heat and Mass Transfer** John Wiley, New York, 1992

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia** VIM – Versão Brasileira do “Vocabulary of basic and general terms in metrology” 2^a ed. Brasileira, Brasília, 2000.

ISAKSON P. **Solar collector model for testing and simulation**. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology, Sweden. 1995.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9806-1. **Test Methods for Solar Collectors, Part 1: Thermal Performance of Liquid Heating Collectors**, ISO, Switzerland. 1993. 55p.

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

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9847; Solar Energy - **Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer** 1992.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO9060 - **Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation**, Genève Switzerland. ,1990.

ITW Institut Für Thermodynamik und Wärmetechnik, Test Report: **Thermal Performance of Solar Collector** acc. To EN 12975-2:2001, Universität Stuttgart, Germany. 2001

JONSON R.A. **Miller and Freund’s Probability & Statistics for Engineers**, Fifth Edition, Chapters 7.9 and 11.7, University of Wisconsin-Madison, USA., 1994. 630p.

KALOGIROU S. (2003) **Solar thermal collectors and applications**, Progress in Energy and Combustion Science v. 30 2004 p. 231–295

KIPP&ZONEN (2000) **Instruction manual CM11 & CM14 pyranometer / albedometer**, Kipp&Zonen, Delft, Holland, v. 1104, 66 p.

KIPP&ZONEN (1999) **Instruction manual CM22 pyranometer**, Kipp&Zonen, Delft, Holland, 63 p.

KLEIN S. A., **The effects of thermal capacitance upon the performance of flat plate solar collectors**, Msc. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI 1974.

KRATZENBERG M.G., BEYER H.G. AND COLLE S. **Setup of a test facility for the characterization of thermal collectors according to the Euronorm at the “Universidade Federal de Santa Catarina”**, Proc. “Sun at the end of the world” International solar energy congress and exhibition, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. 2002.

KRATZENBERG M.G., COLLE S., PEREIRA, MANTELLI NETO S.L., BEYER H.G. **Rastreabilidade de radiômetros para medição da energia solar no Brasil** Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, Brasil. 2003.

KRATZENBERG M., BEYER H.G., COLLE S. AND ALBERTAZZI GONÇALVES A. **Test facility for quasi-dynamic collector tests for the characterization of thermal solar collectors in accordance with the international norms**, Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, Brasil. 2003.

KRATZENBERG M., BEYER H.G., COLLE S. AND PETZOLDT D. **Collector coefficient identification and uncertainty calculation by the “Weighted least square method WLS” for steady-state and quasi- dynamic collector tests**, Proc. Otti-Kolleg Thermische Solarenergie, OTTI e.V., Bad Staffelstein, Germany. 2004.

KRATZENBERG M.G., BEYER H.G., COLLE S. AND PETZOLDT D. **Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test**, EuroSun2004, The 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg, Germany, 2004.

KRATZENBERG M.G., BEYER H., COLLE S. ALBERTAZZI A.G., GÜTHS S., FERNANDES D. 1, OIKAWA P.M.V., MACHADO R.H., PETZOLDT D. **Assessment of the partial model stability of the quasi-dynamic collector test under outdoor conditions en 12975 by the application of uncertainty analysis** Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) International Solar Energy Conference , ISEC 2005, 2005. 7p.

KRATZENBERG M.G., BEYER H., COLLE S. ALBERTAZZI A.G., GÜTHS S., FERNANDES D. 1, OIKAWA P.M.V., MACHADO R.H., PETZOLDT D. **Analysis of the collector test procedures for steady-state and quasi-dynamic test conditions in view of the collector coefficients uncertainties and model stability**, Solar World Congress Orlando, Florida, ISES International Solar Energy Society, 2005. 13 p.

LIENHARD J. IV, LIENHARD J. V **A heat transfer textbook** Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, 2005, 762p.

LUNA DE ABREU S. - LABSOLAR, **Relatório técnico de Coletores solares planos para líquidos, Determinação do rendimento térmico** 2001. 9p.

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., 706 p. 2003.

MONTGOMERY D.C. AND PECK E.A. **Introduction to linear Regression Analysis** Arizona State University John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., 1992. 527 p.

MUSHAWECK J. AND SPIRKL W. **Dynamic solar collector performance testing**. Solar Energy Materials & Solar Cells, 30, 1993. p. 95-105.

MEIR M. G., REKSTAD J. B., LØVVIK O. M. **A study of a polymer-based radiative cooling system** Solar Energy Vol. 73, No. 6, 2002, p. 403–417.

MARION & URBAN K. **User's manual TMY2s- Typical Meteorological Year**, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, U.S.A. 1995.

MATHIOULAKIS E., VOROPOULOS K., BELESSIOTIS V. **Assessment of uncertainty in solar collector modeling and testing**, Solar Energy v. 66, n. 5, 1999. p. 337-347.

MÜLLER-SCHÖLL CH., FREI U. **Uncertainty analyses in solar collector measurements**, Proc. of the Eurosun 2000, Copenhagen, Denmark. 2000.

MUNEER T. **A new method for correcting shadow band diffuse irradiance data**, Journal of Solar Energy Engineering, ASME American society of mechanical engineers. 2002.

MYERS, D.R.; STOFFEL, T.L.; WILCOX, S.; REDA, I.; ANDREAS, A. **Recent progress in reducing the uncertainty in and improving pyranometer calibrations**. American Society of Mechanical Engineers (ASME) Journal of Solar Energy Engineering; 2002; 124: pp. 44-50

ORLANDO A.d.F., **Calibração de um termômetro Pt-100 com padrão de trabalho de um laboratório de serviços metrológicos, metrologia** - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, Brasil. 2003.

PAUSCHINGER T. **Procedure for Testing Solar Collectors under Non Stationary Conditions**. ITW Universität Stuttgart. 1994.

PEREIRA, E. M. D. MESQUITA, L.C., ROCHA, J. M. G., SILVA, M. J., PEREIRA, D. D., SCHIRM, R., DINIZ, A. S. C. **The Brazilian testing program for solar water heating equipment**, Eurosun 2004, Freiburg. Eurosun 2004 - Proceedings. Freiburg : DGS e.v. v. 1. 2004. p. 557-565.

PERERS B. **Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation program's**. J. Int. Solar Energy Soc., 50, 1993. p. 517-526.

PERERS, B. **Optical Modeling of Solar Collectors and Booster Reflectors under Non Stationary Conditions**. Application for Collector Testing, System Simulation and Evaluation. Doctoral Thesis, Uppsala University, ISBN 91-554-3496-7, 1995.

PERERS B. **An improved dynamic solar collector test method for determination of non-linear optical and thermal characteristics with multiple regression**, J. Int. Solar Energy Soc.,v. 59 nº 6 , 1997. p. 163-178.

PETRIE W. AND MCCLINTOCK M. **Determining typical weather for the use in solar energy simulations**. J. Int. Solar Energy Soc.,v. 21, 1978. p. 55-59.

Press W. H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B. P. **Numerical Recipes**, Ch. 14.3. Cambridge University Press, Cambridge. 1992.

PROCTOR D. **A generalized method for testing all classes of solar collectors**. Part I, Solar Energy, v. 32. 1984.

RUBIN, M. **Optical Properties of Soda Lime Silica Glasses** Solar Energy Materials v. 12, 1985. p. 275-288.

SCHNIEDERS J. **Comparison of the energy yield predictions of stationary and dynamic solar collector models and the models' accuracy in the description of a vacuum tube collector** Solar Energy, v. 61, 1997. p.179-190.

SABATELLI V., MARANO D., BRACCIO G. AND SHARMA V.K. **Efficiency test of solar collectors: uncertainty in the estimation of regression parameters and sensitivity analyses**, J. Int. Energy Conversion Management, J.C. Denton, Belton, Texas, U.S.A, v. 42. 2002. p. 2287-2295.

SPIEGEL M.R. **Manual de fórmulas e tabelas matemáticas** Tradução de Roberto Chioccarello MacGraw Hill, 1973. 268 p.

TSOUTSOS T. **Environmental impacts from the solar energy technologies**, Energy Policy, Volume 33, Issue 3, 2005. p. 279-427

WHILLIER **Prediction of performance of solar collectors** CHAPTER VII of applications of solar energy for heating and cooling of buildings, ASHARE GRP 170, ASHARE New YORK, 1977

WIJEYSUNDERA **Comparison of transient heat transfer models for flat plate collectors** Solar Energy, v. 21, no. 6, 1978, University of Sri Lanka, Peradeniya, Sri Lanka, 1978. p. 517-521.

APÊNDICES:

APÊNDICE 1: REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA E DEDUÇÃO DAS INCERTEZAS OBTIDAS PELA REGRESSÃO

1. Introdução

Em uma regressão linear, o modelo $Y_{mo} = a + b X_{me}$ é ajustado aos dados de uma amostra de medições de X_{me} e de Y_{me} , onde se supõe que estes dados sigam a característica do modelo Y_{mo} , descrevendo um efeito físico.

Nesta aproximação, devem-se reduzir os erros que aparecem entre os valores calculados com base no modelo Y_{mo} e os valores medidos Y_{me} $= \sum (Y_{mo} - Y_{me}) \rightarrow \min$. Como estes erros podem ser tanto positivos como negativos, varias soluções de retas podem aparecer, pois os erros negativos e positivos podem ser compensar com diferentes combinações, caso se utilize somente o critério $= \sum (Y_{mo} - Y_{me}) \rightarrow \min$. Isto pode ser evitado utilizando o valor absoluto da diferença entre Y_{mo} e Y_{me} . Uma outra forma de se evitar o efeito descrito foi criada pelo matemático Gauss: quando o quadrado deste erro é formado, não se podem ter valores negativos demonstrado como segue

$$\sum_{i=1}^n (erro)^2 \rightarrow \min = \sum_{i=1}^n (Y_{mo} - Y_{me})^2 \rightarrow \min \quad (80)$$

2. Problemas que podem modificar o resultado em uma regressão linear

Deve-ser ressaltado que este método de regressão é comprometido quando estão presentes *outliners* (pontos muito fora da reta de regressão) que possuam um erro muito grande, pesando assim excessivamente na regressão do modelo. Estes *outliners* podem ser criados, por exemplo, através do mau funcionamento do sistema de medição ou também através de condições (do ambiente) não apropriadas para o ensaio que levem a um comprometimento pontual da medição. O valor quadrático de um *outliner* pode desviar a reta de regressão e deixar os resíduos ϵ em um gráfico ϵ

= f (X) aparecerem de uma forma sistemática. Este erro sistemático também pode aparecer quando o modelo não estiver adequado para a regressão.

Resíduos sistemáticos comprometem a qualidade da regressão. Indicadores matemáticos que fornecem diferentes informações sobre a qualidade da regressão são apresentados nos Capítulos 6.6 a 6.12 deste trabalho.

3. Estimação dos coeficientes em uma regressão linear múltipla / modelo de regressão para amostras infinitas

As subseqüentes deduções foram elaboradas de acordo com a base de deduções feita pelos autores HOFFMANN&VIERA (1987).

Em uma regressão linear múltipla o modelo é dado pela equação (81).

$$\dot{Q}_{me,i} = \hat{Y}_i + \varepsilon_i = \alpha_0 + \alpha_1 X_{1,i} + \alpha_2 X_{2,i} + \dots + \alpha_j X_{j,i} + \varepsilon_i; \quad i = 1..n \quad (81)$$

Sendo α_0 a interseção com o eixo de Y, α_1 a α_j os coeficientes, $X_{1,i}$ a $X_{j,i}$ as variáveis da regressão e ε é a diferença entre o valor medido e o valor do modelo ideal, que consiste em incertezas do modelo e incertezas de medição.

Sabendo que os transdutores apresentam incertezas aleatórias de medição, é necessário considerar o termo de erro, que é denominado ε_i .

Em alguns casos de regressão de modelos, a interseção do modelo não passa pela origem e assim não tem um coeficiente α_0 que determine a interseção (equação 82).

É o caso do modelo de coletor solar adotado pelas normas EN12975 e ISO9806 (equação (9), pg. 33 e equação (12), pg. 36).

$$\dot{Q}_{me,i} = \hat{Y}_i + \varepsilon_i = \alpha_1 X_{1,i} + \alpha_2 X_{2,i} + \dots + \alpha_j X_{j,i} + \varepsilon_i; \quad i = 1..n \quad (82)$$

A equação (82) pode ser expressa como segue

$$\dot{Q}_{mo,i} = \dot{Q}_{me,i} + \varepsilon_i = \sum_{j=1}^k \alpha_j X_{j,i} + \varepsilon_i \quad (83)$$

Onde $\dot{Q}_{mo,i}$ é a potência térmica do coletor estimado pelo modelo e $\dot{Q}_{me,i}$ é a potência térmica medida. Utilizando a notação matricial, o modelo é expresso com a equação que segue

$$\{\dot{Q}_{me}\}_{n,1} = \{\dot{Q}_{mo}\}_{n,1} + \{\varepsilon\}_{n,1} = [X]_{n,k} \{\alpha\}_{k,1} + \{\varepsilon\}_{n,1} \quad (84)$$

Onde

$$\dot{Q}_{mo,i} = \begin{bmatrix} Q_{mo,1} \\ Q_{mo,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{mo,n} \end{bmatrix}; \dot{Q}_{me,i} = \begin{bmatrix} Q_{me,1} \\ Q_{me,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{me,n} \end{bmatrix}; \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_k \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix}; \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

com α_1 a α_n assumidos como coeficientes verdadeiros, que poderiam ser obtidos através de uma regressão com infinitas amostras.

Para se utilizar este modelo paramétrico de regressão, é necessário primeiramente fazer as seguintes pressuposições para a minimização dos erros quadráticos.

- I.) A variável dependente $\dot{Q}_{mo,i}$ é função linear das variáveis independentes ($X_{j,i}$, $i = 1$ a n);
- II.) Os valores das variáveis independentes ($X_{j,i}$, $i = 1$ a n) são fixos;
- III.) O valor esperado (médio) de ε é zero, ou seja, $E\{\varepsilon\} = \{0\}$ onde $\{0\}$ representa um vetor de zeros, onde E indica o valor estimado;
- IV.) Os erros apresentam homoscedasticidade¹⁰, (pg. 60), isto é, $E\{\varepsilon_i^2\} = \sigma^2$;
- V.) Os erros não são correlacionados entre si, isto é, $E\{\varepsilon_j, \varepsilon_h\} = 0$ para $j \neq h$;
- VI.) Os erros ($\{\varepsilon_i\}$, $i = 1..n$) têm distribuição normal.

Combinando as pressuposições IV e V obtém-se a equação que segue

$$\varepsilon_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}; \quad E\{\varepsilon_i^2\} = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-k} \quad (85)$$

As pressuposições I, II e III são necessárias para demonstrar que os estimadores de mínimos quadrados são não-tendenciosos; e as cinco primeiras pressuposições permitem demonstrar que tais estimadores são estimadores lineares não-tendenciosos de variância mínima (teorema de Gaus-Markov). A pressuposição VI é necessária para realizar testes de hipóteses e para construir intervalos de confiança para os parâmetros. A pressuposição IV e V garantem um perfeito funcionamento do modelo. O teorema de Gaus-Markov afirma que os coeficientes estimados são **Best Linear Unbiased Estimators** (BLUE), cuja dedução pode ser verificada em GUJARATI (2003).

4. Algumas considerações do cálculo com matrizes e vetores

Sobre cálculo com matrizes sabe-se que a transposta da multiplicação de uma matriz qualquer [S] com n linhas e p colunas e uma segunda matriz [V] com p linhas e m colunas resulta em uma matriz [R] com m linhas e n colunas, que pode igualmente ser obtida através da multiplicação das transpostas da segunda matriz multiplicada pela primeira matriz como é demonstrado na expressão que segue

$$(S_{n,p} V_{p,m})^T = V_{m,p}^T S_{p,n}^T = R_{m,n} \quad (86)$$

Substituindo-se a matriz [S] pela multiplicação de duas matrizes [A]×[B], obtém-se a expressão que segue

$$((A B)V)^T = (V)^T (A B)^T = V^T B^T A^T \quad (87)$$

Substituindo-se ainda a matriz [V] pela matriz [C] ×[D], obtém-se a expressão que segue

$$((A B)(C D))^T = (C D)^T (A B)^T = D^T C^T B^T A^T \quad (88)$$

Chega-se assim a uma nova regra genérica [expressão (89)], em que a seqüência das matrizes deve ser trocada quando a transposta é realizada para cada matriz em comparação quando a resposta é formada por um produto de matrizes.

$$(A B C D)^T = D^T C^T B^T A^T \quad (89)$$

5. **Estimação dos coeficientes através de uma amostra de dados**

O vetor $\{\alpha\}$ da equação (84) dos coeficientes (assumidos como vetor de coeficientes verdadeiros, que é obtido através de amostras infinitas) pode ser também denominado vetor da população. Este vetor pode ser substituído pelo vetor $\{a\}$, que é um vetor de coeficientes obtidos através de um conjunto de dados de um ensaio de coletor que corresponde aos dados de uma amostra $E\{\alpha\} = \{a\}$. No caso desta amostra, o vetor $\{\varepsilon\}$ da equação (84) é igualmente substituído por $\{\epsilon\}$, chegando assim a equação que segue

$$\{\dot{Q}_{me}\}_{n,1} = \{\dot{Q}_{mo}\}_{n,1} + \{\epsilon\}_{n,1} = [X]_{n,k} \{a\}_{k,1} + \{\epsilon\}_{n,1} \quad (90)$$

Transformando esta equação, é possível obter o vetor dos erros $\{\epsilon\}$ na equação que segue

$$\{\epsilon\}_{n,1} = \{\dot{Q}_{me}\}_{n,1} - \{\dot{Q}_{mo}\}_{n,1} = \{\dot{Q}_{me}\}_{n,1} - [X]_{n,k} \{a\}_{k,1} \quad (91)$$

A equação (92) define as condições para se obter o mínimo dos erros quadráticos,

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2 = \{\epsilon^T\}_{1,n} \{\epsilon\}_{n,1} = \sum_{i=1}^n \left(\dot{Q}_{me,i} - \dot{Q}_{mo,i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\dot{Q}_{me,i} - \sum_{j=1}^k (X_{j,i} a_j) \right)^2 \rightarrow \min \quad (92)$$

sendo de a_1 a a_k os coeficientes estimados pela regressão de uma amostra de dados.

A soma dos quadrados dos desvios na equação (92) pode ser transformada na equação (93), onde o vetor $\{\epsilon\}$ é substituído pelo termo definido na equação (91). O vetor da potência térmica medida $\{\dot{Q}_{me}\}$ é substituído nesta equação por $\{Y\}$ para se ter uma melhor visualização das equações que seguem.

Duas matrizes somente podem ser multiplicadas quando o número de linhas da primeira matriz é igual ao número de colunas da segunda matriz. Para se demonstrar as transformações matriciais em que se pode ver logo qualquer arbitrariedade, o número de linhas e colunas é marcado como primeiro e segundo índice subscrito das matrizes vetores e escalares.

$$SS_{E\ 1,1} = \left(\epsilon^T \right)_{1,n} \epsilon_{n,1} = \left(\left(Y_{n,1} - X_{n,k} a_{k,1} \right)^T \right)_{1,n} \left(Y_{n,1} - X_{n,k} a_{k,1} \right)_{n,1} = \left(\left(Y^T \right)_{1,n} - \left(a^T \right)_{1,k} \left(X^T \right)_{k,n} \right)_{n,1} \left(Y_{n,1} - X_{n,k} a_{k,1} \right)_{1,n} \quad (93)$$

Reescrevendo a equação (93) obtém-se expressão que segue

$$SS_{E\ 1,1} = \underbrace{\left(Y^T \right)_{1,n} Y_{n,1}}_{1.termo} - \underbrace{\left(Y^T \right)_{1,n} X_{n,k} a_{k,1}}_{2.termo} - \underbrace{\left(a^T \right)_{1,k} \left(X^T \right)_{k,n} Y_{n,1}}_{3.termo} + \underbrace{\left(a^T \right)_{1,k} \left(X^T \right)_{k,n} X_{n,k} a_{k,1}}_{4.termo} \quad (94)$$

Formando a transposta do segundo termo da equação (94), é obtido um termo que é igual ao terceiro termo desta equação. Do índice das colunas e linhas do segundo e terceiro termo da equação (94) podem-se observar que ambos os termos têm como resultado um único elemento (escalar). Se um cálculo ou termo de matrizes resulta em um único elemento ou escalar, a transposta deste cálculo ou termo tem também um único elemento (ou escalar) como resultado. Estes escalares são discretamente calculados com as mesmas operações matemáticas e têm o mesmo valor. Assim, é possível simplificar a equação (94) chegando-se à equação (95), pois o segundo e o terceiro termo apresentam o mesmo resultado.

$$SS_E = \underbrace{(Y^T)_{1,n} Y_{n,1}}_{1.termo} - 2 \underbrace{(a^T)_{1,k} (X^T)_{k,n} Y_{n,1}}_{2.termo} + \underbrace{(a^T)_{1,k} (X^T)_{k,n} X_{n,k} a_{k,1}}_{3.termo} \quad (95)$$

6. Obtenção dos valores a_1 a a_k da matriz, na qual o erro quadrático é minimizado

Para saber, por exemplo, em uma função $y = f(x)$ o valor do x em que o valor y é mínimo, deve-se derivar a função $y = f(x)$ em relação a (x) e igualar o resultado a zero $\partial y / \partial x = 0$. Para determinar o mínimo de SS_E , é preciso derivar SS_E da equação (95) com relação aos vetores $\{a\}$ e $\{a^T\}$ (pois estes são as únicas variáveis na equação (95)) e igualar o resultado desta derivada a zero $\partial SS_E = \partial(f_1, f_2) = \partial(a, a^T) = 0$. Os vetores $\{a\}$ e $\{a^T\}$ representam os mesmos coeficientes a_j , porém, no cálculo de matrizes, são matematicamente diferentes. Dessa forma, é necessário determinar o mínimo dos dois vetores variáveis, que pode ser comparado com a definição de um mínimo de uma função tridimensional. Utiliza-se a regra matemática da derivada de produtos de funções (SPIEGEL, 1973) apresentada na equação (96) para se obter as derivações para o registro do mínimo.

$$\frac{\partial}{\partial x} (f_1 f_2) = \frac{\partial f_1}{\partial x} f_2 + \frac{\partial f_2}{\partial x} f_1 = \partial SS_E = \partial(f_1 f_2) = \partial f_1 f_2 + f_1 \partial f_2 \quad (96)$$

Por causa da ausência dos vetores variáveis $\{a\}$ e $\{a^T\}$ no primeiro termo da equação (95), as derivadas deste são iguais a zero.

No segundo termo desta equação o vetor variável $\{a\}$ não aparece, porém a derivada por este vetor é igual a zero. O vetor variável $\{a^T\}$ somente aparece uma vez neste termo, chegando à eliminação do vetor variável $\{a^T\}$ e obtendo o primeiro termo da equação (97) com a formação da derivada deste termo.

Para o terceiro termo é aplicada a equação (96), sendo f_1 e f_2 constituídos dos termos marcados na equação (95), chegando-se ao segundo e terceiro termo da equação (97). Somando-se todas as derivadas e igualando a soma a zero, chega-se à equação (97), que determina as condições de mínimo da função SS_E .

$$\partial SS_E = \underbrace{-2 (\partial a^T) X^T Y}_{1.termo} + \underbrace{(\partial a^T) X^T X a}_{2.termo=\partial f1 f2} + \underbrace{a^T X^T X (\partial a)}_{3.termo=f1 \partial f2} \equiv 0 \quad (97)$$

Aplicando a regra estabelecida pela função (89) para o segundo termo da equação (97), transformando assim este na sua transposta, chega-se ao terceiro termo da equação (97).

Como o segundo e terceiro termos da equação (97) são escalares ou valores únicos, é possível assumir que esses termos são iguais e transformar a equação (97) na equação que segue

$$\partial SS_E = -2 (\partial a^T) X^T Y + 2 (\partial a^T) X^T X a \equiv 0 \quad (98)$$

Essa equação pode ser transformada na equação que segue

$$(\partial a^T) (-2 X^T Y + 2 X^T X a) \equiv 0 \quad (99)$$

Finalmente chega-se à equação (100) que define as condições em que SS_E é minimizado, determinado pela equação que segue

$$[X_{k,n}^T \ X_{n,k}] \{a_{k,1}\} = [X_{k,n}^T] \{Y_{n,1}\} \quad (100)$$

A multiplicação de uma matriz quadrada simétrica de $[X^T X]^{-1}$ com $k \times k$ elementos pela matriz inversa desta matriz $[[X^T X]^{-1}]^T$, igualmente com $k \times k$ elementos resulta em uma matriz unitária $I_{k,k}$ que tem os elementos diagonais (índices $j = i$) iguais a 1 e os elementos não diagonais ($i \neq j$) iguais a zero. Pré-multiplicando a equação (100) pela matriz inversa $[X^T X]^{-1}$ obtém-se a equação (101). Com essa matriz, determina-se o vetor $\{a\}$, pois $[X^T X]^{-1}$ e $[X^T X]$ são matrizes quadradas e assim a multiplicação destas resulta na matriz unitária.

$$[I_{k,k}] \{a_{k,1}\} = \{a_{k,1}\} = [X_{k,n}^T \ X_{n,k}]^{-1} [X_{k,n}^T] \{Y_{n,1}\} \quad (101)$$

7. Determinação das variâncias e incertezas dos coeficientes

Por definição (HOFFMANN&VIERA, 1987), a variância estimada dos coeficientes estimados pela aplicação do método de regressão múltipla é calculada pela equação (102), onde os vetores $\{a\}$ são os coeficientes estimados, e os vetores $\{\alpha\}$ os coeficientes obtidos da população de medições.

$$E[\text{var}(a)] = E\left[\left(\{a\} - \{\alpha\}\right) \times \left(\{a\} - \{\alpha\}\right)^T\right] \quad (102)$$

Trata-se da diferença entre valor estimado e valor verdadeiro dos coeficientes elevado pelo quadrado $(a_1 - \alpha_1)^2$, $(a_2 - \alpha_2)^2$ a $(a_k - \alpha_k)^2$.

Realizando somente um ensaio de coletor obtém-se somente uma amostra de dados que é utilizada para a regressão.

Para estimar o vetor $\{a - \alpha\}$ utiliza-se a equação (100) e substituí-se o vetor das potências térmicas medidas $\dot{Q}_{me} = \{Y_{n,1}\}$ (sabendo que determine o mínimo de SS_E) nesta equação pelo valor estimado $\{\hat{Y}\}$ pela população com a equação que segue

$$\{\hat{Y}_{n,1}\} = \{\dot{Q}_{mo}\}_{n,1} + \{\varepsilon_{n,1}\} = \left([X_{n,k}] \{\alpha_{k,1}\} + \{\varepsilon_{n,1}\} \right) \quad (103)$$

Substituindo-se o vetor $\{Y_{n,1}\}$ na equação (101) pela equação (103), obtém-se a equação que segue

$$E\{a_{k,1}\} = E\left\{ \underbrace{\left[X_{k,n}^T \quad X_{n,k} \right]^{-1} \left[X_{k,n}^T \right]}_{1.\text{termo}} \left([X_{n,k}] \{\alpha_{k,1}\} + \{\varepsilon_{n,1}\} \right) \right\} \quad (104)$$

Multiplicando o termo $[X\alpha]$ e separadamente o vetor $\{\varepsilon\}$ pelo primeiro termo da equação (104) chega-se assim à equação (105), onde $[I_{nk,k}]$ é a matriz de identidade com k colunas e linhas.

$$E\{a\} = \underbrace{\left[X_{k,n}^T \quad X_{n,k} \right]^{-1} \left[X_{k,n}^T \quad X_{n,k} \right]}_{[I_{nk,k}]} \{\alpha_{k,1}\} + \left[X_{k,n}^T \quad X_{n,k} \right]^{-1} \left[X_{k,n}^T \right] \{\varepsilon_{n,1}\} \quad (105)$$

Sabendo que $[I_{n \times k}] \{\alpha_{k,1}\}$ resulta no vetor $\{\alpha_{k,1}\}$ pode-se subtrair o vetor $\{\alpha_{k,1}\}$ de equação (105), obtendo-se assim equação que segue

$$E\{a - \alpha\} = [X_{k,n}^T \times X_{n,k}]^{-1} [X_{k,n}^T] \{\varepsilon_{n,1}\} \quad (106)$$

Utilizando a equação (106) e inserindo esta duas vezes na equação (102), obtém-se equação que segue

$$E\{\text{var}(a)\} = E\left\{ \underbrace{[X_{k,n}^T \ X_{n,k}]^{-1} [X_{k,n}^T] \{\varepsilon_{n,1}\} \{\varepsilon_{1,n}^T\} [X_{n,k}]}_{[I_{n \times k}] \sigma_{1,1}} \underbrace{\left[[X_{k,n}^T \ X_{n,k}]^{-1} \right]^T}_{[X^T X]^{-1}} \right\} \quad (107)$$

A transposta da matriz quadrática $[[X^T X]^{-1}]^T$ é igual a $[X^T X]^{-1}$, por que ambos os lados acima da diagonal são simétricos nesta matriz (tabela 11).

Tabela 11: Matriz de $[[X^T X]^{-1}]^T$ e $[X^T X]^{-1}$

$((X^* X)^{-1})^T = ((X^* X)^{-1})$	1	2	3	4	5	6
1	8.33E-08	-1.85E-07	-8.51E-08	2.43E-06	-5.28E-08	-1.19E-03
2	-1.85E-07	1.16E-06	6.47E-08	-3.26E-06	4.49E-08	-4.57E-04
3	-8.51E-08	6.47E-08	2.49E-07	-6.77E-06	1.31E-07	1.07E-03
4	2.43E-06	-3.26E-06	-6.77E-06	2.83E-04	-5.46E-06	2.46E-03
5	-5.28E-08	4.49E-08	1.31E-07	-5.46E-06	1.10E-07	2.74E-04
6	-1.19E-03	-4.57E-04	1.07E-03	2.46E-03	2.74E-04	1.09E+03

Substituindo $\{\varepsilon\} \{\varepsilon^T\}$ por σ^2 , (sabendo que as variáveis da matriz $[X]$ são fixas depois de serem medidas - verifique pressuposição II) e substituindo as matrizes de $[X]$ com $[I_n]$ na equação (107), obtém-se a equação (108) para calcular a variância dos coeficientes da regressão. Nesta equação a matriz unitária desaparece, porque multiplicando uma matriz quadrada por uma matriz unitária com o mesmo número de elementos obtém-se a mesma matriz como resultado do cálculo.

$$E\{\text{var}(a)_{k,k}\} = [X_{k,n}^T \ X_{n,k}]^{-1} [I_{k,k}] \sigma_{1,1}^2 = [X_{k,n}^T \ X_{n,k}]^{-1} \sigma_{1,1}^2$$

$$\rightarrow E\{\text{var}(a)\} = [X^T \ X]^{-1} \sigma^2 \quad (108)$$

O valor de σ^2 , que é a variância da população, é estimado através da equação (109). Na equação (91) é calculada a soma dos erros quadrados. Para estimar o valor de σ^2 , que determina a variância do erro, precisa-se dividir a soma dos erros quadrados pelos graus de liberdade, chegando-se assim à equação que segue

$$E(\sigma^2) = \frac{\epsilon \times \epsilon^T}{n - k} \quad (109)$$

Sendo $i = 1$ a n o número de valores médios de $[X_{i1}]$ a $[X_{ij}]$ utilizados para a regressão e $j = 1$ a k o número de variáveis independentes (que é igual ao número de coeficientes no modelo linear múltipla sem interseção). Multiplicando os vetores da equação (102) podem-se observar que estes geram uma matriz (na equação (110) mostrado como exemplo para $j = 1..3$) quadrática e simétrica, onde se obtém na diagonal com $i = j$ as variâncias $\text{var}\{a_j\}$ dos coeficientes a_j e fora da diagonal com $i \neq j$ as covariâncias dos mesmos.

$$\text{var}\{a_j\} = \begin{bmatrix} E(a_1 - \alpha_1)^2 & E(a_1 - \alpha_1) \times (a_2 - \alpha_2) & E(a_1 - \alpha_1) \times (a_3 - \alpha_3) \\ E(a_1 - \alpha_1) \times (a_2 - \alpha_2) & E(a_2 - \alpha_2)^2 & E(a_2 - \alpha_2) \times (a_3 - \alpha_3) \\ E(a_1 - \alpha_1) \times (a_3 - \alpha_3) & E(a_2 - \alpha_2) \times (a_3 - \alpha_3) & E(a_3 - \alpha_3)^2 \end{bmatrix} \quad (110)$$

8. Determinação da resposta e sua variância

Obtido o vetor vertical de $\{a\}$, pode-se de forma equivalente obter com a equação (111) a resposta para um ponto $i = 1..n$ qualquer, onde $\{X_{0,i}\}$ é um vetor horizontal das variáveis do mesmo tempo.

$$\dot{Q}_{mo} = \hat{Y}_{amostra} = \{X_{0,i}\}_{1,k} \times \{a_{k,1}\} \quad (111)$$

Para um vetor horizontal de $\{X_0\}$ constituído de $X_{1,i}$ a $X_{k,i}$ variáveis independentes (sendo $i = 1$ a n a enumeração dos valores médios utilizados para a regressão que têm em comum o mesmo tempo), pode-se determinar o escalar da diferença da

resposta do modelo com a equação (112) utilizando o vetor estimado $\{a\}$ e o vetor da população $\{\alpha\}$.

$$\Delta \hat{Y}_i = (\{X_0\}_{1,k} \{a\}_{k,1} - \{X_0\}_{1,k} \times \{\alpha\}_{k,1}) = \{X_0\}_{1,k} \times \{a - \alpha\}_{k,1} \quad (112)$$

Observação: Na literatura relacionada a regressão, o vetor horizontal de $\{X_0\}$ é denominado de $\{X_0^T\}$, mas como um conjunto de variáveis de $X_{1,i}$ a $X_{k,i}$ da matriz $[X]$ é comparável com este vetor e este vetor já é horizontal, é aqui utilizada a nomenclatura de $\{X_0\}$.

Das equações (102) a (109) sabe-se determinar a variância dos coeficientes. Analogamente determina-se a variância da resposta do modelo no ponto $X_{0,i}$ com equação (113) como o quadrado da diferença $\Delta \hat{Y}_i$.

$$\text{var} \hat{Y}_i = \Delta \hat{Y}_i^2 = (\{X_{0,i}\}_{1,k} \{a - \alpha\}_{k,1}) (\{X_{0,i}\}_{1,k} \{a - \alpha\}_{k,1})^T \quad (113)$$

Aplicando a regra de operação de matrizes da equação (89) na equação (113), chega-se assim à equação que segue

$$\text{var}(\hat{Y}) = (\{X_0\} \underbrace{\{a - \alpha\}}_{X^T X \sigma}) (\{a - \alpha\}^T \times \{X_0\}^T) \quad (114)$$

O termo dos coeficientes $\{a\}$ e $\{a\}^T$ nesta equação pode ser substituído como apresentado nas equações (102) a (108), chegando assim à variância da resposta média determinada na equação que segue

$$\begin{aligned} \text{var} \hat{Y}_i &= (\{X_0\} \{a - \alpha\}) (\{a - \alpha\}^T \{X_0^T\}) = \\ &= \{X_0\}_{1,k} \left[[X^T]_{k,n} [X]_{n,k} \right]^{-1} \{X_0^T\}_{k,1} \sigma^2 \end{aligned} \quad (115)$$

9. Cálculo das incertezas dos coeficientes e da resposta média em uma regressão linear múltipla

Tendo as variâncias dos coeficientes e da resposta média do modelo calculado com as equações (108) e (115) (HOFFMANN&VIERA, 1987), pode-se calcular o desvio padrão do valor médio dos coeficientes $\sigma(a_j)$ e da resposta média do modelo $\sigma(\hat{Y})$, que são as raízes das variâncias (compare as equações (116) e (117)). Este desvio padrão é denominado em muitas referências de *erro padrão* ou de *standard error*. Para determinar a incerteza aleatória, tipo A (ou também denominada incerteza gerada através da repetitividade em uma média) multiplica-se o desvio padrão da média pelo valor do *fator de student* (ALBERTAZZI, capítulo 6 2002; ISO-GUM, H3.2 e H3.3 e G4, 2003).

Isto é também realizado para determinar a incerteza de efeitos aleatórios em uma regressão linear múltipla, chegando à equação (116), para determinar as incertezas dos coeficientes (ISO-GUM, 2003, exemplo de cálculo H3.3 e H3.4), e à (117), para determinar as incertezas da resposta média para um determinado ponto de medição.

$$\begin{aligned} U(a_j) &= t_{\alpha/2;n-k} s_e(a_j) = t_{\alpha/2;n-k} \sigma(a_j) = t_{\alpha/2;n-k} u(a_j) = \\ &= t_{\alpha/2;n-k} \sqrt{\text{var}(a_j)} = t_{\alpha/2;n-k} \sqrt{[X^T X]^{-1} \sigma^2} = t_{\alpha/2;n-k} \sigma \sqrt{[X^T X]^{-1}} \end{aligned} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} U(\hat{Y})_i &= U(\hat{Q}_{mo})_i = CI(\hat{Q}_{mo})_i = t_{\alpha/2;n-k} \sigma(\hat{Y})_i = t_{\alpha/2;n-k} u(\hat{Y})_i \\ &= t_{\alpha/2;n-k} \sqrt{\text{var}(\hat{Q}_{mo})_i} = t_{\alpha/2;n-k} \sqrt{\{X_{0,i}\} [X^T X]^{-1} \{X_{0,i}^T\} \sigma^2} \\ &= t_{\alpha/2;n-k} \sigma \sqrt{\{X_{0,i}\} [X^T X]^{-1} \{X_{0,i}^T\}} \end{aligned} \quad (117)$$

Sendo aqui a_j os coeficientes de regressão com $j = 1$ a k coeficientes em um modelo, $\sigma(\hat{Y})_i$, os *desvios padrão da resposta média*, $t_{\alpha/2;n-k}$ o valor de *Student* com nível de significância de $\alpha/2$ e graus de liberdade de $n-k$, onde n são todas as médias formadas para realizar uma regressão e k corresponde ao numero de coeficientes em um modelo sem intersecção.

10. Cálculo do intervalo de predição com o modelo

O intervalo de predição é definido como faixa de incerteza $U(D)$ para a diferença entre valores estimados pelo modelo e valores medidos $U(\dot{Q}_{mo} - \dot{Q}_{me})$, onde esta diferença é determinada pela equação que segue.

$$\begin{aligned} D_i &= \dot{Q}_{mo,i} - \dot{Q}_{me,i} \\ D_i &= \{X_{0,i}\} \{a\} - (\{X_{0,i}\} \{\alpha\} - \varepsilon_i) = \{X_0\}_{1,k} \{a - \alpha\}_{k,1} - (\varepsilon_i)_{1,1} \end{aligned} \quad (118)$$

Querendo-se saber a variância $\text{var}(D_i)$ ou a incerteza padrão $u(D_i)$ da diferença D_i , precisa-se somar as variâncias dos dois termos da equação (118), que são consideradas independentes pela pressuposição V, chegando assim a equação que segue

$$\begin{aligned} \text{var}(D_i) &= \text{var}(\dot{Q}_{mo,i} - \dot{Q}_{me,i}) = \underbrace{\text{var}(\{X_{0,i}\}_{1,k} \{ \{a\}_{k,1} - \{\alpha\}_{k,1} \})}_{\text{var}(\hat{Y})} + \text{var}\{\varepsilon_i\} = \\ u(D_i) &= u(\dot{Q}_{mo,i} - \dot{Q}_{me,i}) = \sqrt{\underbrace{u^2[\{X_{0,i}\} \{ \{a\} - \{\alpha\} \}]}_{\text{var}(\hat{Y})} + u^2\{\varepsilon_i\}} \end{aligned} \quad (119)$$

A variância da resposta média $\text{var}(\hat{Y})$ já foi definida pela equação (115) e a variância de ε é igual a σ^2 (definição da equação (85)), chega-se assim à equação que segue

$$\begin{aligned} \text{var}(D_i) &= \text{var}(\hat{Y}_i) + \text{var}(\varepsilon_i) = \overbrace{\{X_0\} [X^T X]^{-1} \{X_0^T\} \sigma^2}^{\text{var}(\hat{Y}_i)} + \overbrace{\sigma^2}^{\text{var}(\varepsilon_i)} \\ u^2(D_i) &= \text{var}(\hat{Y}_i) + \text{var}(\varepsilon_i) = \{X_0\} [X^T X]^{-1} \{X_0^T\} \sigma^2 + \sigma^2 \end{aligned} \quad (120)$$

Solucionando estes termos, obtém-se a equação (121), com a qual é calculada a variância de D_i .

$$\text{var}(D_i) = \left[1 + \{X_0\} ([X^T][X])^{-1} \{X_0^T\} \right] \sigma^2 \quad (121)$$

O intervalo de predição PI de valores desconhecidos, definido como a incerteza da diferença entre valores estimados e valores medidos $U(\dot{Q}_{mo} - \dot{Q}_{me})$, pode-se obter com a equação que segue

$$PI_i = t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\text{var}(D_i)} = t_{\alpha/2, n-k} \sqrt{\left[1 + \{X_0\} \left[[X^T] [X] \right]^{-1} \{X_0^T\} \right] \sigma^2} \quad (122)$$

APÊNDICE 2: ESCLARECIMENTOS SOBRE AS TERMINOLOGIAS UTILIZADAS EM DIFERENTES REFERÊNCIAS, RELACIONADAS AOS RESULTADOS DE UMA REGRESSÃO

1. *Esclarecimentos relacionados aos resíduos de uma regressão*

Na regressão linear, é minimizada a soma dos quadrados dos resíduos. No livro MONTGOMERY & RUNGER (2003) esta soma é denominada SS_E (*error sum of square*).

A variância s^2 dos resíduos (ϵ_i), que é uma estimativa da variância residual da população $E(\sigma^2)$ em uma regressão (equação 85, pg. 163), é denominada pelo autor GUJARATI(2000) de *variância homoscedástica das perturbações* u_i da população, onde u_i é definido como o desvio ao resíduo. Pelo autor MONTGOMERY&RUNGER(2003), ele é denominado de *residual mean square error* e é comparável com a variância de uma média (compare a equação (36), pg. 96 com a equação (124), pg. 177), pois consiste na *soma dos erros quadrados* sobre o número de graus de liberdade (verifique $\sigma(\bar{x})$ na equação (124)). JONSON R.A (1994) denomina esta variância de $\sigma^2 = S_e^2$, onde $S_e = \text{RMSE}$ e é denominado de *root mean square error*, que pode ser denominado de *desvio padrão experimental*. No programa EXCEL™ este valor é denominado de MQ dos resíduos.

$E(\sigma^2) = S_e^2 = \text{MSE}$: variância experimental de uma regressão (*residual mean square error*)

$S_e = s = E(\sigma) = \text{RSME} = \text{MQ}$: desvio padrão experimental de uma regressão (*root mean square error*)

2. *Esclarecimentos relacionados às incertezas, variâncias e aos desvios padrão dos coeficientes*

Na norma EN12975 disponível (versão alemã) o desvio padrão dos coeficientes (denominado de *Standardabweichung der Koeffizienten*) é utilizado para verificar quais coeficientes se deve utilizar para realizar uma regressão (item 3.7.7). No guia (ISO-GUM, 2003, anexo H3, calibração de um termômetro), é calculada em um

exemplo (correção de um termômetro com uma curva obtida através de uma regressão) a variância experimental do coeficiente de regressão (equação 34, pg. 96), que é denominada neste guia como $s^2(a_1)$. Este cálculo foi reproduzido no programa EXCEL™, onde $u(a_1) = s(a_1)$ é denominado de *erro padrão do coeficiente*. O programa EXCEL™ calcula ainda os valores máximos e mínimos destes coeficientes (denominados no programa de *95% inferiores* e de *95% superiores*) que correspondem à incerteza expandida $U(a_1)$, calculada com a equação (116).

Nos livros MONTGOMERY & RUNGER(2003) e JONSON (1994), o $s_e(a_1)$ é denominado de *standard error*. A formulação correta é:

$u^2(a_j) = s^2(a_j) = s_e^2(a_j)$: variância experimental do coeficiente de regressão

$u(a_j) = s(a_j) = s_e(a_j) = E[\sigma(a_j)]$: desvio padrão ou incerteza combinada do coeficiente de regressão

$U(a_j)$: incerteza expandida do coeficiente de regressão

3. Esclarecimentos relacionados às incertezas dos resultados

O intervalo de confiança da resposta média é determinado pela raiz da variância da resposta média multiplicada pelo *coeficiente de Student* (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). Assim corresponde à incerteza da resposta média, obtida da regressão e é incerteza padrão da resposta média multiplicada pelo *coeficiente de Student* (equação 117, pg. 172) sem considerar incertezas sistemáticas, expressada na unidade da resposta a ser estimada.

O *intervalo de predição de novos valores*, ou também conhecido como *intervalo de predição de novos valores da resposta média* do modelo, é determinado pela equação (122), pg. 174, onde $\text{var}(D)$ é a variância da diferença entre valores medidos e valores do modelo. Comentário: ISO-GUM (2003) em seu exemplo anexo, H3.3 e H3.4, denomina a *incerteza de um valor previsto* para um modelo simples de dois coeficientes só, com um cálculo de incerteza aplicado aos coeficientes e à equação do modelo, para obter a incerteza da resposta do modelo, levando em consideração a correlação entre os coeficientes e calculando estes efeitos com o coeficiente de correlação entre os coeficientes. Para modelos mais complexos o ISO-GUM (2003) se referencia em FULLER (1987).

APÊNDICE 3: INTERPRETAÇÃO DAS TERMINOLOGIAS INTERVALO DE CONFIANÇA E INTERVALO DE PREDIÇÃO

Para entender-se melhor o que é o *intervalo de predição* e o *intervalo de confiança* em uma regressão, estes são aqui calculados comparativamente para um conjunto de observações e a avaliação de incertezas padrão da média destas observações, considerando as incertezas sistemáticas corrigidas.

1. *Repetitividade comparada com o intervalo de predição*

Quando se calcula uma média \bar{x} e um desvio padrão experimental $s(x_i)$ que estima o desvio padrão da população $E(\sigma(x_i))$ de uma grandeza qualquer para um intervalo, obtém-se a repetitividade para esta média $Re(\bar{x})$ (equação 123), onde $Re(\bar{x})$ é a faixa de dispersão dentro da qual se situa o erro aleatório (normalmente para probabilidade de 95%), (ALBERTAZZI, 2002). Comparável com Re (equação 123) é o intervalo de predição PI para a resposta média de um modelo (equações (38), (39) e (40), pg. 99), que é a faixa de dispersão dentro da qual se situa o erro aleatório da resposta do modelo.

$$Re = \pm t s(x_i) \quad ; \quad \bar{x} - Re(\bar{x}) < x_i < \bar{x} + Re(\bar{x}) \quad (123)$$

A probabilidade de enquadramento desejada e o número de dados envolvidos é definido pelo *coeficiente de Student* (t). Pela equação (123) 95% dos valores medidos x_i se localizam dentro do intervalo $\bar{x} \pm t\sigma$, considerando-se que os valores de $(x_i - \bar{x})$ seguem uma distribuição normal, onde \bar{x} e $\sigma(x_i)$ são calculados com equação que segue

$$\bar{x} = 1/n \times \sum_{i=1}^n x_i \quad ; \quad E(\sigma) = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (124)$$

2. Intervalo de predição em regressão multilinear

Comparável com a repetitividade Re é o intervalo de predição PI para a resposta média de um modelo (equações (38) a (40), pg. 99). Equivalente a um ajuste de uma função linear através da regressão, o intervalo de predição do modelo prediz os valores medidos, com a confiança escolhida (95% dos valores se mantêm dentro do limite superior e inferior da predição definidos pela equação (38), pg. 99).

3. Incerteza expandida comparada com o Intervalo de confiança

Para reduzir a incerteza do tipo A de um valor qualquer medido, deve-se fazer muitas medições. Com estas medições, reduz-se o *desvio padrão da média* $\sigma(\bar{x})$ e, conseqüentemente, a incerteza expandida (compare a equação (127) com a equação (117), pg. 172). A incerteza expandida de uma média qualquer é calculada com a equação (127), onde u_c é a incerteza combinada, calculada com a equação (125) e t é o *coeficiente de Student* (ISO-GUM, 2003). Este fator de abrangência obtém-se através da tabela de *Student* (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). As incertezas independentes podem ser combinadas com a equação que segue

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 \dots u_n^2} \quad (125)$$

Onde u_1 a u_n são as incertezas padrão.

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\left(\frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots \frac{u_n^4}{v_n} \right)} \quad (126)$$

Calcula-se assim a incerteza expandida com a equação (127). Pode-se ver na equação de Welch-Satterthwaite (126) que para o caso onde somente há uma incerteza padrão, u_c é igual a u_1 e v_{ef} é igual a v_1

$$U = u_c \quad t = u_p \quad t = \sigma(\bar{x}) t = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t; \quad u_p = \sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (127)$$

onde t é o fator de abrangência (*coeficiente de Student*) e $\sigma(\bar{x})$ é o *desvio padrão experimental da média* (ISO-GUM, 2003). Com a utilização do intervalo de confiança padrão de 95% o valor de k , por exemplo, varia somente de $k = 2,28$ a $2,0$ para $n = (10 \text{ a } \infty)$ valores. Comparando as equações (127) e (123) pode-se notar a diferença principal entre estas, que é o valor de $1/\sqrt{n}$. A repetitividade (intervalo de predição) é através deste fator reduzido, chegando-se assim à incerteza (que se pode denominar também *intervalo de confiança*, pois determina com 95% de confiança a faixa onde se localiza o valor verdadeiro), porém, muito menos que 95% dos valores de localizam-se dentro desta faixa.

Em regressões do tipo multilinear a equação (127) é comparável à equação (117), pg. 172, onde o *desvio padrão da média* $\sigma(\bar{x})$ da equação (127) é comparável com o *desvio padrão da resposta média* $\sigma(\hat{Y})$. Na regressão, intervalo de confiança (incerteza da resposta média) é estimada através da raiz da *variância da resposta média* $\text{var}(\hat{Y})$ multiplicada pelo *coeficiente de Student* (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

APÊNDICE 4: BALANÇOS DE INCERTEZAS COM MEMORIAIS DE CÁLCULO

1. Piranômetros

O fabricante especifica as incertezas desses transdutores em função de diferentes parâmetros de operação, tais como: radiação de onda longa do céu (gerando um offset no piranômetro), temperatura ambiente, variação da temperatura ambiente (gerando um segundo offset no piranômetro), altura do sol (ângulo zênite do sol), ângulo de montagem do piranômetro, faixa de operação (não linearidade), tipo de cobertura do céu (sensibilidade espectral) - verifique as especificações em Anexo 1. Durante a calibração e as medições com os piranômetros, estes estão sendo utilizados em faixas limitadas de operação e em decorrência disto, obtém-se uma redução das incertezas que aparecem nessas faixas limitadas.

1.1 Considerações especiais sobre as incerteza gerada pela variação na resposta direcional

A incerteza originada pela variação da resposta direcional representa a maior fonte de incerteza de medição da radiação solar. Ela é de forma sistemática desconhecida e é especificada para ângulos zenitais de (0 a 80)° em \pm (0 a 6)% para piranômetros do tipo CM11¹⁶ e em \pm (0 a 3)% para piranômetros do tipo CM22¹⁷. Para ângulos zenitais de 0° ela é especificada em 0% para os dois piranômetros^{16,17}. Esta incerteza é originada por minutos heterogeneidades dos dois domos de cristal e pela reflexão dos raios solares através do sensor dos piranômetros. O conjunto destas duas influências foi especificado pelo fabricante. Durante a calibração do piranômetro CM10 com o piranômetro CM22, utilizado como padrão, e durante a medição nos ensaios SST, são somente utilizadas medições com ângulos zenitais abaixo de 40°, obtendo-se assim incertezas de \pm (0 a 1,5)% para piranômetros do tipo CM11¹⁶ e de \pm (0 a 0,8)% para piranômetros do tipo CM22¹⁷. Durante a medição nos ensaios QDT, são utilizadas medições com ângulos zenitais abaixo de

¹⁶ KIPP&ZONEN (2000) Instruction manual CM11 pyranometer, pagina 22, figura 9

¹⁷ KIPP&ZONEN (1999) Instruction manual CM22 pyranometer, pagina 18, figura 7

60°, obtendo-se assim incertezas de $\pm (0 \text{ a } 2)\%$ para piranômetros do tipo CM11¹⁶. A incerteza gerada pela resposta direcional do piranômetro padrão, utilizado para a calibração, foi medida pelo fabricante. O fabricante obteve incertezas abaixo de 0,37% para ângulos zenitais abaixo de 40°¹⁸, combinados com os ângulos azimutais de: leste, sul e oeste no hemisfério norte, que correspondem aos ângulos: oeste, norte e leste no hemisfério sul (verifique a instalação a manual instalação do piranômetro CM22). Estes são os ângulos que apareceram na calibração do CM11 com o padrão CM22, assim como na calibração do piranômetro CM22 com o pirheliômetro de padrão secundário HF31111.

2. Calibração dos piranômetros

Durante o processo de calibração de comparação, aparecem incertezas sistemáticas não desprezíveis tanto no transdutor padrão (CM22) como no transdutor a ser calibrado (CM10). Algumas das grandezas de influência são aqui consideradas correlacionadas (com coeficiente de correlação positiva), pois os dois piranômetros têm a construção mecânica com as dimensões externas idênticas e são assim igualmente influenciados. O efeito de correlação explica por parte a baixa repetitividade que aparece durante a calibração do transdutor CM11, utilizando CM21 como padrão (tabela 12). As incertezas são especificadas para algumas das grandezas de influência em forma absoluta [W/m^2] e para outras em forma relativa [%]. Dos dados de 3 semanas de medição em condições *outdoor* (ambiente externo) foram selecionados 3790 valores medidos com os critérios especificados pela norma ISO9847 (1992). O balanço da incerteza foi elaborado para a média dos 3790 valores (734 W/m^2). Comentário: Pela seleção, esta média obteve somente 76 W/m^2 como desvio padrão.

2.1 Memorial para o balanço de incertezas relativo a calibração dos piranômetros

Os efeitos DtPa até Ru da tabela 12, pg. 187 são de natureza sistemática não conhecida, e, portanto, são considerados como efeitos aleatórios no balanço de

¹⁸ Anexo 1, *Measurement Report*, CM22 Serial number 0200072

incertezas (ISO-GUM, 2003). Pela correlação dos efeitos, durante a medição com os dois piranômetros, é considerado que algumas das incertezas sistemáticas se compensam durante a calibração destes transdutores. Sendo assim, considera-se infinitos graus de liberdade para estas incertezas e distribuição uniforme com divisor de $\sqrt{3}$.

Repetitividade (Re)

Com $n = 19$ intervalos de 10 min selecionados com os critérios da ISO 9847 foram calculados o mesmo número de coeficientes de sensibilidades e obtiveram-se para os dois piranômetros do tipo CM10 coeficientes de (5,9102 e 4,9653) $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ ¹⁹ com desvios padrão de (0,0395 e 0,0355) $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ que corresponde a (0,67 e 0,71)%. Pela norma ISO 9847, o valor recomendado para o desvio padrão é de $\pm 0,5\%$. Transforma-se o desvio padrão máximo em $5,30 \text{ W}/\text{m}^2$, representando 0,71% da radiação média ($734 \text{ W}/\text{m}^2$). Para se obter a incerteza padrão da média representando a repetitividade, deve-se dividir o desvio padrão pela raiz dos valores medidos n , obtendo-se assim este valor com $\pm 1,22 \text{ W}/\text{m}^2$ para o desvio padrão da média, que corresponde à incerteza padrão. Com $(n - 1)$ valores se obtiveram-se $\nu = 18$ graus de liberdade.

Incerteza do padrão CM22 (Pa)

Como o fabricante não especifica a incerteza de calibração do piranômetro padrão CM22²⁰, foi utilizada a especificação da calibração de um outro piranômetro de padrão secundário, porém de classificação inferior (CM21)²². Este foi calibrado pelo fabricante com o mesmo procedimento de calibração e obtido em $\pm 1,38\%$ ²¹ como incerteza expandida para o coeficiente de sensibilidade. Na tabela 12, esta incerteza foi transformada em $\pm 10,13 \text{ W}/\text{m}^2$, representando $\pm 1,38\%$ da radiação média ($734 \text{ W}/\text{m}^2$). Considera-se distribuição normal correlacionado a esta incerteza obtida pelo fabricante, com divisor 2 e infinitos graus de liberdade.

¹⁹ Originalmente determinados pelo fabricante em (5,94 e 4,98) $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$

²⁰ Anexo 1, CALIBRATION CERTIFICATE, PYRANOMETER CM22, 020072

²¹ Anexo 1, CALIBRATION CERTIFICATE, PYRANOMETER CM21, 0414xx

Deriva temporal do padrão (DtPa)

Para o intervalo de tempo de 2 anos e 6 meses entre a calibração do padrão CM22²⁰ e da calibração do CM11 no LABSOLAR, em Julho de 2004, foi calculada com uma deriva temporal de $\pm 0,5\%$ por ano²² (que corresponde a $3,67 \text{ W/m}^2$ por ano em relação a radiação média da calibração) uma deriva total de $\pm 9,16 \text{ W/m}^2$.

Resposta direcional em função dos ângulos zênite e azimute (Rd)

Relaciona-se a incerteza de $\pm 1,5\%$ do transdutor CM11 (apêndice, item 1.1) à radiação média da calibração, obtém-se uma incerteza de $\pm 11,01 \text{ W/m}^2$ para a resposta direcional.

Offset provocado pela variação da temperatura ambiente (OS I)

Com os termopares dos piranômetros é medida a diferença da temperatura entre o corpo (que é pelo ventilador do piranômetro mantido à temperatura ambiente) e o sensor do transdutor, onde o sinal deste é proporcional à diferença entre a sua temperatura e a do ambiente. O corpo não consegue acompanhar variações bruscas da temperatura ambiente, gerando assim um desvio denominado de *offset*, que é especificado em $\pm 2 \text{ W/m}^2$ para o transdutor CM11 e em $\pm 1 \text{ W/m}^2$ para o transdutor CM22. Considera-se que os efeitos sistemáticos²² que aparecem nos dois instrumentos simultaneamente durante a calibração de comparação se compensam parcialmente, obtendo-se $\pm (2 - 1) \text{ W/m}^2 = \pm 1 \text{ W/m}^2$.

Offset provocado pela radiação de onda longa do céu (OS II)

Através da emissão de radiação de onda longa do domo para o céu, que tem a sua temperatura equivalente de corpo negro inferior ao do piranômetro, aparece um resfriamento do domo e do corpo deste decorrente do contato térmico que o corpo tem com o domo. Simultaneamente aparece um resfriamento do sensor do piranômetro pelos dois domos resfriados. Destes efeitos obtém-se um segundo offset na medição com este transdutor, que é especificado em 7 W/m^2 para o piranômetro CM11 e em 3 W/m^2 para o CM22. Considera-se que estes efeitos sistemáticos²² aparecem nos dois instrumentos durante a calibração, e em

²² Anexo 1, CM Series Specifications, CM3, CM6B, CM11, CM21, CM22

decorrência ocorre parcialmente a compensação destes, obtendo-se assim $\pm (7 - 3) \text{ W/m}^2 = \pm 4 \text{ W/m}^2$.

Deriva térmica (Dter)

Considerando-se as derivas térmicas do piranômetro CM11 de $\pm 0,9 \%$ ²³, obteve-se uma deriva térmica de $\pm 6,6 \text{ W/m}^2$. Observação:

Comparando-se as características das incertezas dos piranômetros CM11 e CM22, provocadas pela temperatura ambiente, observam-se que estas são apenas parcialmente correlacionadas ^{23, 24}. O piranômetro CM11 tem uma incerteza de $\pm 0,9 \%$ na faixa de $(0 \text{ a } 40)^\circ\text{C}$ e o piranômetro CM22 $\pm 0,2 \%$. Enquanto o CM11 pode ter incertezas negativas e positivas²³, o CM11 somente tem incertezas positivas²⁴ para a faixa de $(20 \text{ a } 40)^\circ\text{C}$ temperatura ambiente, portanto, não se possam considerar efeitos de compensação das duas derivas térmicas durante a calibração.

Não linearidade do piranômetro (NL)

A não linearidade é um efeito que pode ser corrigido com as curvas de correção apresentadas nos manuais dos transdutores. Como o fabricante não especifica por quantos anos estas curvas de correção podem ser utilizadas, não foram aplicadas correções. Os efeitos da não linearidade são considerados como incertezas sistemáticas com característica desconhecida, aparecendo nos dois transdutores simultaneamente durante a calibração. O fabricante especifica para a faixa de $(0 \text{ a } 1000) \text{ W/m}^2$ uma não linearidade de $\pm 0,2 \%$ para o piranômetro CM22 e de $\pm 0,6 \%$ para o piranômetro CM11 ²². Obtém-se assim, na faixa de medição de $(600 \text{ a } 1100) \text{ W/m}^2$, incertezas máximas de $\pm (0,6 - 0,2)\% = \pm 0,4\%$, que correspondem a $(4,4 - 1,47) \text{ W/m}^2 = 2,94 \text{ W/m}^2$.

Resposta espectral (Es)

As sensibilidades espectrais, que dependem da transmitância do domo e da absortância da cavidade, são para piranômetros do tipo CM22 e para outros piranômetros de padrão secundário (CM21, CM11 e CM10), comparados pelo

²³ KIPP&ZONEN (2000) Instruction manual CM11 pyranometer, pagina 21, figura 8

²⁴ KIPP&ZONEN (1999) Instruction manual CM22 pyranometer, pagina 17, figura 6

fabricante²⁵. Nesta comparação, o fabricante especifica para todos os transdutores uma sensibilidade espectral de $\pm 2\%$ para o espectro da radiação solar terrestre de (0,3 a 3) μm . Como os dois piranômetros são expostos durante a calibração a mesma radiação solar e assim ao mesmo espectro desta, é aqui considerado que efeitos de espectro se compensam durante a calibração. Considerando-se diferenças na sensibilidade espectral entre o CM10 e o CM21, é estimada uma incerteza de $\pm 0,5\%$, que soma de $\pm 3,67\text{ W/m}^2$, relacionado à radiação média de 734 W/m^2 .

Resolução do sistema de medição do HP34970A (R)

A resolução do instrumento a ser calibrado é de $6^{1/2}$ dígitos (Anexo 1, especificação HP34970A), onde que corresponde a uma resolução $0,0001\%$. O máximo de *erro de truncamento* corresponde à metade do valor da resolução (ALBERTAZZI, 2001), que corresponde a $\pm 0,05\ \mu\text{V}$ (em relação ao final da faixa de medição de 100 mV). Dividindo este valor pelo coeficiente de sensibilidade de $5,0056\ \mu\text{V/Wm}^{-2}$, obtém-se uma incerteza de $\pm 0,01\text{ W/m}^2$.

Incerteza da deriva temporal do datalogger HP34970A

Esta incerteza não precisa ser considerada, porque o HP34970A foi calibrado 1 semana antes de utilizar esta unidade de medição e multiplexação para a calibração dos piranômetros.

Incerteza do conversor A/D

Para uma nova calibração dos componentes do sistema de medição a cada ano, obtém-se pela especificação do fabricante duas incertezas do conversor A/D, que são $0,0002\%$ da leitura e $0,0001\%$ da faixa de medição (Anexo 1, especificação HP34970A), que corresponde a (0,01 e 0,1) μV , relacionando-se estes valores à leitura máxima²⁶ de 6 mV e o final da faixa de medição de 100 mV . Dividindo-se o coeficiente de sensibilidade de $5,0056\ \mu\text{V/Wm}^{-2}$, obtém-se uma incerteza de (0,002 e 0,02) W/m^2 resultando em $0,0202\text{ W/m}^2$.

²⁵ KIPP&ZONEN (2004), Instruction manual CM22, APPENDIX I

²⁶ Utiliza-se a leitura máxima em vez da leitura por que esta incerteza é muito baixa, e assim o valor máximo já pode ser utilizado para toda a faixa de medição.

Autozero OFF

O instrumento foi operado com a função *autozero* ligada, portanto não se podem desprezar erros deste tipo (Anexo 1, especificação HP34970A) e (AGILENT- *USERS GUIDE*, 1997).

Incerteza da deriva térmica

São obtidos pela especificação do fabricante da unidade de medição HP34970A dois erros, que são 0,0006% / K da leitura e 0,0001 % /K da faixa de medição. Segundo a especificação deste instrumento, devem-se considerar estes erros somente nas faixas de (0 a 18)°C e (28 a 55)°C. Quando o datalogger é operado na faixa de (18 a 28)°C, não é necessário de considerar estes erros (Anexo 1, especificação HP34970A), como ocorre no caso da calibração, na qual o instrumento foi operado em uma ambiente com ar-condicionado.

Incerteza gerada pelo cabo

O cabo de sinal tem uma resistência de 8 Ω /100 m. Com 40 m de comprimento total obtém-se uma resistência total de 3,3 Ω . O piranômetro gera uma tensão de aproximadamente 5mV com 1000 W/m² de radiação solar. Com esta tensão e 10 M Ω como resistência de entrada do instrumento de medição, obtém-se uma corrente no cabo que liga o piranômetro com o sistema de medição de 0,5 nA, que causa uma queda de tensão de 1,65 nV no cabo. Dividindo-se o coeficiente de sensibilidade de 5,0056 μ V/Wm⁻², obtém-se uma incerteza de 0,0003 W/m² como incerteza produzida pelo cabo, que pode ser desprezada.

Incerteza na calibração do MULTIFUNCTION CALIBRATOR (MFC)

O *Multifunction calibrator* (certificado de calibração em Anexo 1), foi calibrado com uma incerteza de $\pm 8,9 \mu$ V e com offset de 1,6 μ V. Estas incertezas foram consideradas no balanço de incertezas. Obteve-se para o valor da raiz da soma das incertezas quadradas $\pm 9,04 \mu$ V. Pela divisão do coeficiente o de sensibilidade do piranômetro padrão, de 8,87 μ V/ Wm⁻², obtém-se incertezas de 1,02 W/m².

Incerteza de calibração do HP34970A na medição do piranômetro padrão

Somente podia ser medida uma vez durante a calibração do HP34970A (item 5.10.5 pg. 85). Portanto não podiam ser estimadas incertezas desta calibração. Considerou-se as incertezas em $20 \mu\text{V}$ (compare o certificado de calibração do padrão *Multifunction Calibrator*, em que foram obtidas incertezas de $8,9 \mu\text{V}$, anexo 1). Pela divisão do *coeficiente de sensibilidade* do piranômetro padrão, de $8,87 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$, obtém-se assim incertezas de $2,25 \text{ W}/\text{m}^2$.

Incerteza de calibração da unidade de medição na medição dos piranômetros durante a calibração

Como a unidade de medição HP34970A e os piranômetros CM10 foram calibrados em um conjunto com o uso do padrão CM22, não é necessário de considerar as incertezas de calibração do HP34970A nas medições durante a calibração.

As incertezas de DtPa até AD são incertezas obtidas de especificações pelos fabricantes e utilizou-se portanto distribuição uniforme e infinitos graus de liberdade com que a incerteza especificada deve ser dividido pela raiz de três segundo a ISO-GUM (2003). Obtiveram-se com a equação (126) 129730 graus de liberdade efetiva, que é na tabela considerada como infinito por ser um número alto.

Tabela 12: Balanço de incertezas da calibração do piranômetro CM10

fontes de incertezas		efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
símbolo	descrição		valor bruto [W/m ²]	tipo de distribuição	divisor	u [W/m ²]	ν
Re	Repetitividade na calibração (tipo A)		1,22	normal	1,00	1,22	19
Pa	Incerteza do padrão (CM22)		10,13	normal	2,00	5,06	∞
DtPa	Deriva temporal do padrão		9,16	uniforme	1,73	5,29	∞
Rd	Resposta direcional (em função dos ângulos zênite e azimute)		11,01	uniforme	1,73	6,36	∞
OS I	Offset provocado pela variação da temperatura ambiente		1,00	uniforme	1,73	0,58	∞
OS II	Offset provocado pela radiação de onda longa do céu		4,00	uniforme	1,73	2,31	∞
Dter	Deriva térmica		6,60	uniforme	1,73	3,81	∞
NL	Não linearidade		2,94	uniforme	1,73	1,70	∞
ReE	Resposta de espectro		3,67	uniforme	1,73	2,12	∞
R	Resolução (sistema de medição)		0,01	uniforme	1,73	0,01	∞
AD	Erro do conversor A/D		0,02	uniforme	1,73	0,01	∞
MFC	Incerteza na calibração do <i>multifunction calibrator</i>		1,02	normal	2,00	0,51	∞
Cal	Incerteza na calibração do HP34970A		2,25	normal	2,00	1,13	∞
	Correção combinada						
	Incerteza padrão combinada			normal		11,16	∞
	Incerteza expandida			normal		22,32	

3. Medição com os piranômetros

Na tabela 13 foi elaborado um *balanço de incertezas* para a medição da radiação global de 800 W/m^2 (radiação que é utilizada para traçar a curva de eficiência padronizada de ensaios SST, figura 3, pg. 35).

A tabela 14 foi elaborada um *balanço de incertezas* para a medição da radiação difusa de 120 W/m^2 (radiação que é utilizada, junto com a radiação global de 800 W/m^2 , para traçar a curva de eficiência padronizada de ensaios QDT, normalizada para as condições de contorno de ensaios SST, item 6.5.1).

3.1 Memorial para o balanço de incertezas de medição da radiação global

Incerteza de aliasing

Para identificar efeitos de aliasing, foi medida a radiação global com o intervalo de medição de 1 s durante 3 semanas e foram observados nestas medições variações no sinal da radiação com freqüências não inferiores a $0,0025 \text{ Hz}$, que corresponde a intervalos maiores que 400 s. Segundo o teorema de *sampling* (IFEACHOR & JERVIS, 1993), a freqüência de medição deve ser superior a duas vezes a freqüência do sinal medido, obtendo assim um intervalo de medição máximo de 200 s. Com o intervalo de medição de 6 s, utilizado no ensaios, não é preciso considerar as incertezas originadas pelo efeito de aliasing.

Repetitividade

Como a repetitividade é uma incerteza aleatória, e as incertezas de efeitos aleatórios já são consideradas pela regressão, não é necessário de considerá-las neste balanço de incertezas.

Incerteza de calibração (Cal)

Utilizou se a *incerteza combinada* do *balanço de incerteza de calibração* e os graus de liberdade efetivos obtidos neste balanço de incertezas (tabela 12).

Deriva temporal do transdutor (DtPa)

Considerando uma nova calibração dos piranômetros CM10 a cada ano, obtém-se para este intervalo uma deriva temporal de $\pm 0,5\%$ por ano²⁷, que corresponde a 4 W/m^2 , relativo à radiação de 800 W/m^2 .

Resposta direcional em função dos ângulos zênite e azimute (Rd)

Relaciona-se a incerteza de $\pm (0 \text{ a } 2)\%$ do transdutores CM11 e CM10 [que aparece em medições com ângulos zenitais de $(0 \text{ a } 60^\circ)$, que correspondem aos ângulos dos ensaios QDT] à radiação média de 800 W/m^2 , obtém-se uma incerteza de $\pm 16 \text{ W/m}^2$ para a resposta direcional.

Offset provocado pela variação da temperatura ambiente (OS I)

Este *offset* é especificado em $\pm 2 \text{ W/m}^2$ para o transdutor CM11(e CM10)²².

Offset provocado pela radiação de onda longa do céu (OS II)

Este efeito é especificado em $\pm 7 \text{ W/m}^2$ para o piranômetro CM11(e CM10)²².

Deriva térmica (Dter)

O piranômetro CM11(e CM10) tem uma incerteza de $\pm 1 \%$ na faixa de $(0 \text{ a } 40)^\circ\text{C}$ ²⁸. Relaciona-se estas derivas térmicas do piranômetro CM11/CM10 à radiação de 800 W/m^2 , obtendo-se uma deriva térmica de $\pm 8 \text{ W/m}^2$.

Resposta espectral (Es)

Nos dados técnicos do manual do piranômetro CM11 o fabricante especifica incertezas de $\pm 2 \%$ para medições no espectro de $(0,35 \text{ a } 1,5) \mu\text{m}$. Nesta faixa de espectro localizam-se aproximadamente 95% da radiação terrestre solar²⁹. Considerando que os 5% restantes da radiação solar são medidos com incertezas superiores, estimadas em 10 %, obtém-se a estimativa total de $\pm 2,5 \%$ como incertezas da resposta espectral, que correspondem à 20 W/m^2 , relacionado a 800 W/m^2 .

²⁷ Anexo 1, CM Series Specifications, CM3, CM6B, CM11, CM21, CM22

²⁸ KIPP&ZONEN (2000) Instruction manual CM11 pyranometer, pagina 21, figura 8

²⁹ KIPP&ZONEN (2000) Instruction manual CM11 pyranometer, pagina 11, figura 3

Não linearidade

O fabricante especifica para a faixa de (0 a 1000) W/m^2 uma incerteza de *não linearidade* de $\pm 0,6 \%$ para o piranômetro CM11²², que corresponde a $4,8 \text{ W/m}^2$.

Incerteza gerada pela montagem inclinada do piranômetro

Esta incerteza é especificada pelo fabricante em $\pm 0,2 \%$ ²⁷, que corresponde a $\pm 1,6 \text{ W/m}^2$, relacionada a 800 W/m^2 .

Incerteza de calibração da unidade de medição

Não é necessário de considerar estas incertezas.

Resolução do sistema de medição do HP34970A

Fazendo-se os mesmos cálculos da calibração dos piranômetros, obtém-se $\pm 0,01 \text{ W/m}^2$ como incerteza de resolução.

Incerteza da deriva temporal do HP34970A

Considerando uma nova calibração dos componentes do sistema de medição a cada ano, obtém-se pela especificação do fabricante da unidade de medição HP34970A duas derivas temporais, que são $0,01 \%$ da leitura e $0,001 \%$ da faixa de medição (Anexo1, dados técnicos do HP34970A) e corresponde a (0,6 e 1) μV , relacionando-se estes valores à leitura máxima²⁶ de 6 mV, e ao final da faixa de medição de 100 mV. Dividindo-se o coeficiente de sensibilidade de $5,0056 \mu\text{V/Wm}^{-2}$, obtém-se uma incerteza de (0,12 e 0,2) W/m^2 , resultando em $0,32 \text{ W/m}^2$.

Incerteza do conversor A/D

Fazendo-se os mesmos cálculos da calibração dos piranômetros, obtém-se $\pm 0,0202 \text{ W/m}^2$ como incerteza de resolução.

Autozero OFF; Incerteza da deriva térmica; Incerteza gerada pelo cabo

Estas incertezas são desconsideráveis ou desprezíveis como as destes itens obtidos pela calibração.

Tabela 13: Balanço de incertezas da medição da radiação global de 800 W/m² com o piranômetro CM10

fontes de incertezas		efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
símbolo	descrição		valor bruto [W/m ²]	tipo de distribuição	divisor	u [W/m ²]	ν
Cal	Incerteza de calibração		22,32	normal	2,00	11,16	∞
DtPa	Deriva temporal		4,00	uniforme	1,73	2,31	∞
Rd	Resposta direcional (em função dos ângulos zênite e azimute)		16,00	uniforme	1,73	9,24	∞
OS I	Offset provocado pela variação da temperatura ambiente		2,00	uniforme	1,73	1,15	∞
OS II	Offset provocado pela radiação de onda longa do céu		7,00	uniforme	1,73	4,04	∞
Dter	Deriva térmica		8,00	uniforme	1,73	4,62	∞
NL	Não linearidade		6,00	uniforme	1,73	3,46	∞
ReE	Resposta de espectro		20,00	uniforme	1,73	11,55	∞
MIn	Incerteza originada pela montagem inclinada		1,60	uniforme	1,73	0,92	∞
R	Resolução (sistema de medição)		0,01	uniforme	1,73	0,01	∞
DtS	Deriva temporal (sistema de medição)		0,32	uniforme	1,73	0,18	∞
AD	Erro do conversor A/D		0,02	uniforme	1,73	0,01	∞
	Correção combinada						
	Incerteza padrão combinada			normal		20,01	∞
	Incerteza expandida			normal		40,02	

As incertezas de Cal até AD (tabela 13) são incertezas obtidas pelas especificações dos fabricantes, portanto, foram considerados infinitos graus de liberdade e distribuição uniforme com os quais a incerteza especificada deve ser dividida pela raiz de três, segundo o guia ISO-GUM (2003).

Observação: Como foi observado, aproximadamente 75% da energia da radiação solar, aparente em ensaios QDT, são originadas através de radiações solares acima de 700 W/m², que correspondem às condições de céu limpo ou com poucas nuvens. Pelas seguintes razões as maiores incertezas do piranômetro, originadas pelo espectro e pelo ângulo do zênite, devem ser inferiores às estimadas em 2,5%:

- Pela especificação do piranômetro, a alta incerteza da resposta direcional se reduz para ângulos zenitais inferiores¹⁶. Nestes ângulos aparecem as altas radiações solares.
- Incertezas geradas pela refletância da superfície do sensor do piranômetro se reduzem para bandas de frequências reduzidas da radiação solar³⁰, em que

³⁰ KIPP&ZONEN (2000) Instruction manual CM11 pyranometer, pagina 10, figura 2

aparecem intensidades altas de radiação solar (DUFFIE & BECKMANN, 1991, figura 2.6.4).

3.2 Memorial para o balanço de incertezas relativo a medição da radiação difusa

Esta incerteza é relacionada à radiação difusa média de 120 W/m^2 , que é considerada para a curva padronizada do ensaio QDT, normalizada para as condições de contorno do ensaio SST.

Incerteza de aliasing

Idem, medição da radiação global (observou-se que a radiação difusa tem variações ainda menores que a radiação global no QDT).

Repetitividade

Como a repetitividade é uma incerteza aleatória, não é necessário considerá-la neste balanço de incertezas. As incertezas dos efeitos aleatórios já são consideradas pela regressão.

Incerteza de calibração

A incerteza obtida pela calibração é considerada como incerteza relativa, pois esta se relaciona ao coeficiente de calibração. A incerteza expandida de $22,19 \text{ W/m}^2$ (tabela 12) é assim relacionada à radiação média de 734 W/m^2 da calibração, obtendo desta forma uma incerteza de 3,03 %, correspondente à incerteza do coeficiente de sensibilidade. Para a medição da radiação difusa de 120 W/m^2 , obtém-se assim uma incerteza de calibração de $3,65 \text{ W/m}^2$.

Deriva temporal do transdutor de medição (DtPa)

Considerando uma nova calibração dos piranômetros CM10 a cada ano, obtém-se para este intervalo uma deriva temporal de $\pm 0,5\%$ por ano³¹ (que corresponde a $0,60 \text{ W/m}^2$), relativo à radiação difusa de 120 W/m^2 .

³¹ Anexo 1, CM Series Specifications, CM3, CM6B, CM11, CM21, CM22

Resposta direcional em função dos ângulos zênite e azimute (Rd)

Relaciona-se a incerteza de $\pm 2\%$ do transdutor CM11(CM10), determinada pelo fabricante para o ângulo zenital de 60° (correspondente ao ângulo equivalente na medição da radiação difusa de $\theta_{ed} = 56,93^\circ$, item 2.11) à radiação média da calibração, obtém-se então uma incerteza de $\pm 2,4 \text{ W/m}^2$ para a resposta direcional.

Offset provocado pela variação da temperatura ambiente (OS I)

Este *offset* é especificado em $\pm 2 \text{ W/m}^2$ para o transdutor CM11²².

Offset provocado pela radiação de onda longa do céu (OS II)

Este efeito é especificado em 7 W/m^2 para o piranômetro CM11²².

Deriva térmica (Dter)

O piranômetro CM11 tem uma incerteza de $\pm 1\%$ na faixa de $(0 \text{ a } 40)^\circ\text{C}$ ³². Relacionam-se estas derivas térmicas do piranômetro CM11 à radiação de 120 W/m^2 , obtém-se uma deriva térmica de $\pm 1,2 \text{ W/m}^2$.

Não linearidade

O fabricante especifica para a faixa de $(0 \text{ a } 1000) \text{ W/m}^2$ uma incerteza de *não linearidade* de $\pm 0,6\%$ para o piranômetro CM11(CM10)²², que corresponde a $\pm 0,72 \text{ W/m}^2$, relativo a 120 W/m^2 .

Resposta espectral (Es)

Idem à medição da radiação global, estima-se $2,5\%$ como incerteza, que corresponde a 3 W/m^2 , em relação à radiação difusa média de 120 W/m^2 .

Incerteza gerada pela montagem inclinada do piranômetro

Esta incerteza é especificada pelo fabricante em $\pm 0,2\%$ ²², que corresponde a $0,24 \text{ W/m}^2$, relacionada a 120 W/m^2 .

³² KIPP&ZONEN (2000) Instruction manual CM11 pyranometer, pagina 21, figura 8

Resolução do sistema de medição do HP34970A

Idem ao cálculo da calibração e da medição da radiação global, obtém-se $\pm 0,01 \text{ W/m}^2$ como incerteza de resolução.

Incerteza da deriva temporal do HP34970A

Utilizando a mesma seqüência de cálculo, como na medição da radiação global, obtém-se incertezas de (0,012 e 0,2) W/m^2 , resultando em $0,21 \text{ W/m}^2$.

Incerteza do conversor A/D

Idem à calibração e à medição da radiação global, obtém-se $0,0202 \text{ W/m}^2$.

Autozero OFF; Incerteza da deriva térmica; Incerteza gerada pelo cabo

Estas incertezas são desconsideradas (idem à calibração e à medição da radiação global).

Correção da radiação difusa

Pelo sombreamento com o anel do transdutor, a radiação difusa é reduzida e deve ser, portanto, corrigida (item 5.9.4). Segundo MUNEER (2002), sem a correção a média mensal de medições da radiação difusa é até 24 % abaixo da radiação difusa medida pela diferença entre radiação global e a radiação direta. O modelo de MUNEER realiza a correção destas diferenças. Os 24 % correspondem a uma correção média de $28,8 \text{ W/m}^2$ (calculado para as medições individuais pelo modelo de correção) relacionados à radiação difusa de 120 W/m^2 .

Incertezas obtidas pela aplicação da correção para o transdutor da medição da radiação difusa

As incertezas de $\pm 23 \text{ W/m}^2$ RMSE (item 5.9.4), observadas na correção, utilizando o modelo de MUNEER (2002), devem ser consideradas no balanço de incertezas.

As incertezas de DtPa até MUN são incertezas obtidas através das especificações feitas pelos fabricantes dos instrumentos ou de artigos científicos, portanto considerou-se infinitos graus de liberdade e distribuição uniforme, com os quais a incerteza especificada deve ser dividida pela raiz de três, segundo o guia ISO-GUM (2003).

Tabela 14: Balanço de incertezas para a medição da radiação difusa de 120 W/m² com o piranômetro CM10

fontes de incertezas		efeitos sistemáticos [W/m ²]	Efeitos aleatórios				
símbolo	descrição		valor bruto [W/m ²]	tipo de distribuição	divisor	u [W/m ²]	v
Cal	Incerteza de calibração		3,65	normal	2,00	1,83	∞
DtPa	Deriva temporal		0,60	uniforme	1,73	0,35	∞
Rd	Resposta direcional (em função dos ângulos zênite e azimute)		2,40	uniforme	1,73	1,39	∞
OS I	Offset provocado pela variação da temperatura ambiente		2,00	uniforme	1,73	1,15	∞
OS II	Offset provocado pela radiação de onda longa do céu		7,00	uniforme	1,73	4,04	∞
Dter	Deriva térmica		1,20	uniforme	1,73	0,69	∞
NL	Não linearidade		0,72	uniforme	1,73	0,42	∞
ReE	Resposta de espectro		3,00	uniforme	1,73	1,73	∞
MIn	Incerteza originada pela montagem inclinada		0,24	uniforme	1,73	0,14	∞
R	Resolução (sistema de medição)		0,01	uniforme	1,73	0,01	∞
DtS	Deriva temporal (sistema de medição)		0,21	uniforme	1,73	0,12	∞
AD	Erro do conversor A/D		0,02	uniforme	1,73	0,01	∞
MUN	Incertezas obtidas pela aplicação da correção		23,00	uniforme	1,73	13,28	∞
CMU	Correção máxima mensal	28,8		uniforme	1,73	0,00	∞
	Correção combinada						
	Incerteza padrão combinada			normal		14,25	∞
	Incerteza expandida			normal		28,50	

4. Calibração dos transdutores de temperatura

Os balanços de incertezas de calibração e de medição destes transdutores devem ser elaborados para verificar se as incertezas de medição se encontram abaixo das incertezas determinadas pelas normas ISO9806 e EN12975 de 0,07 K. Os balanços foram utilizados também para calcular a incerteza combinada da energia produzida pelo coletor.

4.1 Memorial da calibração dos transdutores de temperatura

Os cálculos neste balanço foram elaborados para obter incertezas expandidas máximas para a faixa de temperatura em que os transdutores foram calibrados.

Repetitividade durante a calibração (Re)

1.) Com a equação (31), pg. 83, foi realizada uma regressão linear múltipla. Com o valor de $\sigma = 0,006$ K, $\sigma_c = 0,0072$ K e $t_{\alpha/2, n-k} = 1,967$ (compare item 6.7.1) aplicado na regressão da calibração da temperatura, obteve-se um intervalo de confiança

máximo de $\pm 0,0019$ K, correspondendo a uma incerteza padrão da resposta média de $\pm 0,001$ K (compare equação (117), pg. 172) e os seguintes níveis de confiança observadas: 100 % para os 89 valores medidos em 10°C; 100 % para os 72 valores medidos em 34°C; 97,3 % para os 38 valores medidos em 56°C e 95,9 % para os 122 valores medidos em 80°C. Nas temperaturas onde apareceram pequenas instabilidades do banho (item 5.10.2), foram realizadas mais medições.

2.) Um segundo caminho para determinar a incerteza de repetitividade é o de calcular o desvio padrão experimental $s(x)$, obtido através das diferenças entre os valores do termômetro padrão e do transdutor a ser calibrado. Neste caso, o valor da média na equação (124), pg. 177 é substituído pelo valor medido com o termômetro padrão. Segundo (ALBERTAZZI, 2001), no seu item 8.7, passo 3, a incerteza padrão da repetitividade, que corresponde ao desvio padrão da média, é calculada com a equação (127) para n valores medidos. O maior valor deste cálculo, com $\pm 0,001$ K de incerteza padrão, foi obtido para os 38 valores medidos em 56°C. A incerteza padrão de 0,001 K, calculada com os dois métodos apresentados, foi utilizada no balanço de incertezas com $\nu = (38 - 1)$ graus de liberdade.

Incerteza do padrão (Pa)

A incerteza expandida do termômetro padrão (incluindo as incertezas do transdutor e as do sistema de medição) com o fator de abrangência de $k = 2$ na faixa de - (39 a 157) °C é especificada em $\pm 0,026$ K (certificado de calibração em Anexo 1). Pela linearização realizada com o polinômio, utilizando as medições durante a calibração deste padrão, as incertezas do termômetro padrão são consideradas somente de forma aleatória³³. Sendo assim, escolhe-se a distribuição normal e infinitos graus de liberdade.

Incerteza da deriva temporal do padrão (DtPa)

³³ A mesma linearização que é realizada com o termômetro padrão, é também realizada para o ajuste das curvas dos 8 transdutores Pt100, que foram calibrados, e assim para estes transdutores também não são consideradas incertezas sistemáticas.

1.) A deriva temporal não é especificada pelo fabricante do termômetro padrão (conjunto termorresistência e sistema de medição). O laboratório LATER obteve para este termômetro somente uma calibração (Anexo 1), não tendo assim experiências com o desvio temporal para este tipo de termômetro. Estimou-se uma deriva temporal, obtida com a diferença de duas medições no *ponto do gelo* no intervalo de um ano. Obteve-se uma diferença de $0,006 \Omega$ entre a resistência medida durante a calibração deste padrão de $R_0 = 100,001 \Omega$ (Certificado de calibração do termômetro de resistência de platina de 100Ω , V-PT-100, anexo 1) e a média tirada desta resistência de $R_0 = 100,007 \Omega$, que por sua vez foi obtida através das 6 medições feitas antes e depois da calibração dos transdutores P100, classe A. Com a diferença obtida de $0,006 \Omega$ e o gradiente do transdutor PT100 de $2,565 \text{ K}/\Omega$ para 0°C , estimou-se uma deriva temporal de $0,016 \text{ K}$ para o intervalo de um ano.

Observação: O banho de gelo com água desmineralizada tem uma reprodutibilidade muito boa, portanto é possível utilizar o valor medido como deriva e aplicar com este uma correção às medições obtidas com o padrão.

2.) Do fabricante *FLUKE-HART Scientific* observaram-se para os termômetros de padrão *secondary reference*, que é inferior ao termômetro utilizado de padrão secundário (*secondary standard*), derivas anuais entre $\pm (0,01 \text{ a } 0,02) \text{ K}$. Utilizou-se a deriva anual de $\pm 0,02 \text{ K}$ no balanço de incertezas para se estimar a deriva com segurança.

Incerteza gerada pela resistência do fio (Rfi)

Na medição por 4 fios, o RTD do tipo PT100, classe A, é alimentado por uma corrente constante de 1 mA , utilizando-se dois fios. Com mais dois fios, é realizada a medição da tensão. Como na calibração e na medição foram utilizados diferentes comprimentos destes fios, os fios que medem a tensão possuem diferentes quedas de tensão nestes dois processos. A máxima queda de tensão é aqui contabilizada como incerteza. O fio com 40 m de comprimento total e $8 \Omega / 100 \text{ m}$ de resistência tem uma resistência total de $3,3 \Omega$. Na termorresistência, tem-se uma queda de tensão mínima de $1 \text{ mA} \cdot 100 \Omega = 0,1 \text{ V}$. Com esta tensão e $10 \text{ M}\Omega$ como resistência de entrada na unidade de medição, obtém-se uma corrente de entrada de $0,1 \text{ V} / 10 \text{ M}\Omega = 10 \text{ nA}$, que origina uma queda de tensão de $10 \text{ nA} \cdot 3,3 \Omega = 0,32 \text{ nV}$ nos fios que medem a tensão, que por sua vez correspondem a $0,0003 \%$ relativo as $0,1 \text{ V}$

calculados, correspondendo assim a $0,00032 \Omega$. Com o gradiente máximo de $2,654 \text{ K}/\Omega$ obtém-se uma incerteza máxima de $0,001 \text{ K}$.

Incerteza de calibração do datalogger HP34970A

Como a unidade de medição HP34970A e as termorresistências PT100, classes A foram calibradas em um conjunto, utilizando o termômetro padrão como referência com o seu sistema de medição próprio, não é preciso considerar a incerteza de calibração do HP34970A.

Resolução da unidade de medição (R)

A resolução do instrumento a ser calibrado é de $6^{1/2}$ dígitos (Anexo 1, especificação HP34970A), que corresponde a uma resolução $\pm 0,0001 \%$. O máximo de *erro de truncamento* corresponde à metade do valor da resolução (ALBERTAZZI, 2001), que corresponde a $\pm 0,00005 \%$ e $\pm 0,5 \mu\Omega$ relativo ao final da faixa de medição de $1 \text{ k}\Omega$. Entre $(10 \text{ e } 80)^\circ\text{C}$ o PT100 varia a sua resistência em $(104 \text{ a } 131) \Omega$, com um gradiente máximo para 80°C de $2,654 \text{ K}/\Omega$, obtendo assim uma incerteza de $0,001\text{K}$.

Incerteza do conversor A/D (AD)

Obtêm-se pela especificação do fabricante da unidade de medição HP34970A duas incertezas, que são $0,01 \%$ da leitura e $0,001 \%$ do final da faixa de medição. Considerando a leitura máxima de 131Ω e a faixa de utilização de $(0 \text{ a } 1) \text{ k}\Omega$, obtêm-se as incertezas $(0,001 \text{ e } 0,0003) \Omega$, que correspondem a $(0,003 \text{ e } 0,0007) \text{ K}$, resultando em uma deriva de $0,0037 \text{ K}$.

Autozero OFF

O instrumento foi operado com a função *autozero* habilitada, portanto é necessário considerar erros deste tipo.

Incerteza da deriva térmica do sistema de medição

Obtêm-se pela especificação do fabricante da unidade de medição HP34970A duas incertezas, que são $0,0006 \%/K$ da leitura e $0,0001 \%/K$ da faixa de medição. Segundo a especificação deste instrumento (Anexo 1), estes erros somente devem ser considerados nas faixas de $(0 \text{ a } 18)^\circ\text{C}$ e $(28 \text{ a } 55)^\circ\text{C}$. Quando o datalogger é

operado em ambientes com (18 a 28)°C, não é necessário considerar estas incertezas, como é no caso tanto na calibração quanto na medição (ensaio de coletores), quando a unidade de medição foi operada em uma ambiente controlada com um sistema de ar-condicionado.

Ruído na medição

Segundo o manual do HP34970A não existe incerteza através do ruído do instrumento de medição quando este é operado no modo de 6 ½ dígitos, como no presente caso.

Graus de liberdade efetivos

Com a equação de Welch-Satterthwaite (126) obtiveram-se 2515955 graus de liberdade efetivos, que foram no balanço de incerteza considerado infinitos.

As incertezas DtPa até AD foram consideradas de distribuição uniforme com divisor de raiz de três (ISO-GUM 2003).

Tabela 15: Balanço de incertezas de calibração dos transdutores de temperatura

fontes de incertezas		efeitos sistemáticos [K]	Efeitos aleatórios				v
símbolo	descrição		valor bruto [K]	tipo de distribuição	divisor	u [K]	
Re	Repetitividade		0,001	normal	1,00	0,0010	37
Pa	Incerteza do padrão		0,026	normal	2,00	0,0130	∞
DtPa	Deriva temporal do padrão		0,020	uniforme	1,73	0,0116	∞
Rfi	Resistência do fio		0,001	uniforme	1,73	0,0006	∞
R	Resolução (sistema de medição)		0,001	uniforme	1,73	0,0006	∞
AD	Erro do conversor A/D		0,004	uniforme	1,73	0,0021	∞
Cc	Correção combinada						
Uc	Incerteza padrão combinada			normal		0,018	∞
U	Incerteza expandida			normal		0,035	K

4.2 Memorial do balanço de incertezas de medição com os transdutores de temperatura

Repetitividade (R)

Das três temperaturas medidas - a temperatura de entrada do coletor T_{in} , a temperatura de saída do coletor T_{out} , e a temperatura de ambiente T_a - a temperatura de saída é a que possui as maiores variações, T_a tem menores variações e T_{in} é constante com variações muito pequenas. As variações de T_{out} no intervalo de medição de 6 s são interpretadas pelo modelo com a utilização do componente $a_6 X_6$ da equação (12), pg. 36, e as de T_a são interpretadas com o modelo pelo uso dos componentes $a_4 X_4$ e $a_5 X_5$. Com as variações dentro do intervalo de 300 s, iria se superestimar a repetitividade na utilização do desvio padrão destas médias para calcular a incerteza padrão. Portanto, somente as variações de T_{in} são aqui consideradas para calcular a incerteza padrão da repetitividade. Para uma seqüência de médias selecionadas, obtidas de medições durante um dia de ensaio, obteve-se um desvio padrão médio de 0,262 K. Os *desvios padrão* utilizados foram estimados utilizando 50 medições, obtidos no intervalo de medição de 6 s. Com os 0,262 K calcula-se o desvio padrão da média de $0,262 \text{ K} / \sqrt{50} = 0,037 \text{ K}$, que corresponde à incerteza padrão. Observa-se, que esta incerteza é provavelmente superestimada, porque mesmo as variações menores de T_{in} são interpretadas pela regressão, tanto pela medição da potência térmica \dot{Q}_{me} como no cálculo da temperatura média do coletor, utilizando o modelo \dot{Q}_{mo} deste.

Incerteza de calibração das termorresistências (CAL)

Utilizou-se a incerteza combinada da calibração com os inerentes graus de liberdade destas incertezas (tabela 15).

Deriva temporal das termorresistências PT100, classe A (DTmR)

Por não existir informações especificadas pelo fabricante das termorresistências PT100 classe A, utilizou-se o valor de $\pm 0,05 \text{ K}$ como deriva para um ano, obtido através de experiências na utilização de termorresistências deste tipo ³⁴.

Incerteza gerada pela resistência do fio (Rfi)

³⁴ <http://www.cip.ukcentre.com/pt100.htm>, homepage da empresa N.E.M Business Solutions

Idem à calibração obtém-se uma incerteza de 0,001 K.

Resolução da unidade de medição (R)

As termorresistências utilizadas são medidas na calibração e independentemente no ensaio, portanto esta incerteza deve ser considerada novamente. Idem da calibração, obtém-se uma incerteza de 0,001 K.

Incerteza da deriva temporal da unidade de medição (DTm1 e DTm2)

Considerando uma nova calibração dos componentes do sistema de medição a cada ano, obtém-se pela especificação do fabricante da unidade de medição HP34970A (Anexo1) duas derivas temporais, que são 0,01 % da leitura e 0,001 % do final da faixa de medição. Considerando a leitura máxima de 131 Ω e a faixa de utilização de (0 a 1) k Ω , obtém-se as incertezas (0,013 e 0,01) Ω , que correspondem a (0,0345 e 0,0265) K como derivas temporais aparecendo durante um ano. Como as duas derivas são especificadas separadamente pelo fabricante, no balanço de incertezas estas são consideradas como independentes, porque se não iriam determinar uma das maiores incertezas neste balanço.

Incerteza do conversor A/D (AD)

Idem à calibração, obtém-se uma incerteza de 0,0037 K.

Ruído na medição e Autozero OFF

Estas incertezas são desconsideradas. Idem à calibração das termorresistências.

Incerteza de calibração do datalogger HP34970A

Idem à calibração das termorresistências.

As incertezas DtPa até AD foram consideradas de distribuição uniforme com divisor de raiz de três e infinitos graus de liberdade (ISO-GUM 2003).

fontes de incertezas		efeitos sistemáticos [K]	Efeitos aleatórios				v
símbolo	descrição		valor bruto [K]	tipo de distribuição	divisor	u [K]	
Re	Repetitividade		0,037	normal	1,00	0,0370	49
Cal	Incerteza da calibração		0,035	normal	2,00	0,0175	∞
DtPa	Deriva temporal das termoresistências		0,050	uniforme	1,73	0,0289	∞
Rfi	Resistência do fio		0,001	uniforme	1,73	0,0006	∞
R	Resolução da unidade de medição		0,001	uniforme	1,73	0,0006	∞
DTm1	Deriva témporal da unidade de medição (final da faixa)		0,013	uniforme	1,73	0,0075	∞
DTm2	Deriva témporal da unidade de medição (valor medido)		0,010	uniforme	1,73	0,0058	∞
AD	Erro do conversor A/D		0,004	uniforme	1,73	0,0021	∞
Cc	Correção combinada						
Uc	Incerteza padrão combinada			normal		0,051	∞
U	Incerteza expandida			normal		0,102	K

5. Medição da vazão

O balanço de incertezas de medição deste transdutor foi realizado para verificar se as incertezas de medição estavam abaixo das incertezas determinadas pelas normas ISO9806 e EN12975 de 1%. Incertezas sistemáticas e aleatórias podem ser somadas neste balanço de incertezas, porque a vazão não é utilizada no modelo do coletor, mas apenas na medição da potência térmica.

5.1 Memorial do balanço de incertezas de medição do transdutor de vazão

Escolheu-se a vazão de 50,08 l/h onde apareceram durante a calibração máximos desvios de 0,16 % (Anexo1, certificado de calibração do medidor IFS4000W/6).

Repetitividade (R)

Para uma seqüência de médias selecionadas, tiradas de medições de um dia de ensaio, obteve-se um desvio padrão médio de 0,56 litros por hora, onde as médias do desvio padrão foram estimadas, utilizando 50 medições, que por sua vez foram obtidos com o intervalo de medição de 6 s. Através deste desvio padrão, foi

estimado o desvio padrão da média em $0,56 / \sqrt{50} = 0,079$ l/h, que corresponde à incerteza padrão.

Incerteza de calibração do medidor de vazão (CAL1,CAL2,CAL3)

Pelo certificado de calibração (Anexo1, medidor IFS4000W/6 com conversor IFC020), obtêm-se incertezas do ensaio de $\pm 0,11\%$, incertezas originadas pela influência da temperatura ambiente de $0,03\%$, com a temperatura de calibração em 3°C acima da temperatura especificada e um desvio de $-0,16\%$. Como foi difícil corrigir o desvio utilizando as medições da calibração, por causa da alta aleatoriedade deste em diferentes faixas de medição, este efeito sistemático foi tratado como incerteza aleatória (ISO-GUM, 2003). Relacionam-se estes efeitos à vazão de 50 l/h e obtêm-se $\pm (0,055, 0,015$ e $0,081)$ l/h, que foram consideradas independentes (tabela 17).

Incerteza do medidor de vazão (IMV)

O medidor de vazão consiste em dois componentes - o medidor e do conversor eletrônico - que inclui o mostrador, e a geração da corrente, que origina o campo elétrico para este transdutor e o transmissor do sinal que gera um sinal de (4 a 20) mA. Dependente do conversor eletrônico utilizado, o fabricante especifica uma incerteza total para este transdutor, somente considerando incertezas do conversor eletrônico (Anexo1, folha de dados, medidor magnético de vazão). Para conversores do tipo IFC010 é especificado $\pm 0,5\%$ e para IFC020, que foi utilizado no experimento, é especificado $\pm 0,3\%$ (Anexo 1, características, IFC010 e IFC020). Relativo à vazão de 50 l/h, obtêm-se uma incerteza de $\pm 0,15$ l/h.

Deriva temporal do medidor de vazão (DTmV)

Por não existirem valores concretos especificados pelo fabricante, nem calibrações anteriores destes transdutores de vazão considerou-se a metade da incerteza deste transdutor como *deriva temporal* para um ano. Com uma nova calibração a cada ano, obtêm-se uma incerteza de $\pm 0,075$ l/h.

Incertezas do fio de transmissão do sinal

Estas incertezas não necessitam ser consideradas, porque o sinal foi transmitido em forma de (4 a 20) mA.

Incertezas da resistência shunt (SH)

Para medir a corrente de (4 a 20) mA, foi utilizada uma resistência *shunt* na entrada da unidade de medição, onde esta corrente origina uma tensão, que é medida pela unidade de medição. Utilizando a incerteza (Anexo 1, *100 ohm current shunt terminal input module*) de $\pm 0,01\%$ e $0,0008\% / ^\circ\text{C}$, obtém-se para uma temperatura desta resistência de (15 a 35) $^\circ\text{C}$ a incerteza de 0,018 %. Relaciona-se esta incerteza à vazão de 50 l/h e obtém-se uma incerteza de 0,036 l/h.

Resolução do sistema de medição do HP34970A

A resolução da unidade de medição é de $6^{1/2}$ dígitos (Anexo 1, especificação HP34970A), que corresponde a 0,0001 %. O máximo de *erro de truncamento* corresponde à metade do valor da resolução (ALBERTAZZI, 2001), que corresponde a $\pm 1\ \mu\text{V}$ (em relação ao final da faixa de medição de 2 V). Pelo transmissor é gerado um sinal de (4 a 20) mA, correspondendo a uma vazão de (0 a 200) l/h. Os 50 l/h de medição correspondem a 4 mA, que correspondem a uma tensão de $4\ \text{mA} \cdot 100\ \Omega = 0,4\ \text{V}$. A resolução de $\pm 1\ \mu\text{V}$ corresponde assim $\pm 0,00025\%$, ou a $\pm 0,000125\ \text{l/h}$, relacionado ao valor de medição de 50 l/h.

Incerteza da deriva temporal do datalogger HP34970A

Considerando uma nova calibração dos componentes do sistema de medição a cada ano, obtém-se pela especificação do fabricante da unidade de medição HP34970A duas derivas temporais, que são 0,01 % da leitura e 0,001 % da faixa de medição (Anexo1, dados técnicos do HP34970A) e correspondem a (0,2 e 0,02) mV relaciona-se estes valores à leitura máxima²⁶, que é igual ao final da faixa de medição de 2 V. Estas tensões correspondem às incertezas de vazão de (0,025 e 0,0025) l/h, resultando em 0,0275 l/h (50 l/h correspondem a 0,4 V).

Incerteza do conversor A/D

Para uma nova calibração dos componentes do sistema de medição a cada ano, obtêm-se pela especificação do fabricante duas incertezas do conversor A/D, que são 0,0002 % da leitura e 0,0001 % da faixa de medição (Anexo 1, especificação HP34970A), que correspondem a (4 e 2) μV , relativo à leitura máxima²⁶ de 2 V, que é igual ao final da faixa de medição de 2 V. Estas tensões correspondem às incertezas de vazão de (0,0005 e 0,00025) l/h, resultando em 0,00075 l/h (50 l/h correspondem a 0,4 V).

Autozero OFF

O instrumento foi operado com a função *autozero* ligada, portanto se pode desprezar erros deste tipo (Anexo 1, especificação HP34970A) e (AGILENT- *USERS GUIDE*, 1997).

Incerteza da deriva térmica

Idem a da medição das radiações solares. Estas incertezas não necessitam de ser consideradas.

Incerteza de calibração do HP34970A

Esta só podia ser medida uma vez durante a calibração do HP34970A (item 5.10.5 pg. 85). Portanto, não se pôde estimar as incertezas desta calibração. Considerou-se as incertezas em 20 μV (compare o certificado de calibração do padrão *Multifunction Calibrator*, em que foram obtidas incertezas de 8,9 μV , anexo 1).

Em relação ao 0,4 V, que correspondem a 50 l/h, obtiveram-se assim incertezas de 0,0025 l/h.

5.2 Balanço de incertezas de medição do transdutor de vazão

As incertezas IMV até CALU foram consideradas de distribuição uniforme com divisor de raiz de três (ISO-GUM 2003). Obtiveram-se através da equação (126) 4036 graus de liberdade efetiva, que é na tabela considerada como infinita por ser um número alto.

Tabela 17: Balanço de incertezas de medição com o medidor de vazão

fontes de incertezas		efeitos sistemáticos [l/h]	Efeitos aleatórios				v
símbolo	descrição		valor bruto [l/h]	tipo de distribuição	divisor	u [l/h]	
Re	Repetitividade		0,0790	normal	1,00	0,0790	49
Cal	Incerteza da calibração do medidor de vazão		0,1510	normal	2,00	0,0755	∞
IMV	Incerteza do medidor de vazão		0,1500	uniforme	0,73	0,2055	∞
DtmV	Deriva temporal do medidor de vazão		0,0750	uniforme	1,73	0,0434	∞
ISH	Incerteza da resistência <i>shunt</i>		0,0360	uniforme	1,73	0,0208	∞
R	Resolução da unidade de medição		0,0001	uniforme	1,73	0,0001	∞
DTSM	Deriva témporal da unidade de medição		0,0275	uniforme	1,73	0,0159	∞
AD	Incerteza do conversor A/D		0,0075	uniforme	1,73	0,0043	∞
CalU	Calibração da unidade de medição		0,0025	uniforme	1,73	0,0014	∞
Cc	Correção combinada						
Uc	Incerteza padrão combinada			normal		0,238	∞
U	Incerteza expandida			normal		0,476	l/h

Esta incerteza expandida corresponde a 0,95 % relativo à vazão de 50 l/h e é assim inferior à incerteza especificada em 1 % pelas normas EN12975 e ISO9806 para ensaios de coletores. Sabendo que incertezas absolutas têm o seu maior peso em faixas baixas de medição, podem-se para vazões entre (50 e 200) l/h com boa aproximação utilizar os 0,95% para estimar a incerteza expandida.

APÊNDICE 5: DEDUÇÃO DOS SUBMODELOS DO ENSAIO EM REGIME QUASE DINÂMICO

1. Capacitâncias térmicas do coletor

Com o modelo simples do coletor, como é apresentado nas equação (9), pg. 33, pode-se somente modelar a característica do coletor quando o sol estiver irradiando com potência constante e for posicionado bem em cima do coletor (ISO9806). Este modelo não funciona com as variações da radiação solar natural, ou seja, de acordo com as nuvens e com o ângulo do sol. Nesta situação, um modelo quase dinâmico do coletor solar (como descrito na EN12975) corrige os efeitos da variação de temperatura média do coletor T_m , provocado pela capacitância térmica do coletor e da água que este contém. O modelo de capacitância térmica mais simples do coletor é apresentado nas figura 19 e figura 20, e é também denominado *modelo de dois nós*. T_m representa a temperatura média do fluido, T_{ab} a temperatura do absorvedor e T_a a temperatura ambiente. O absorvedor é o primeiro componente aquecido pelo sol, tendo assim uma temperatura superior a todos os outros componentes. Um bom contato térmico entre o absorvedor e o tubo que transporta o fluido aquecido para fora do coletor (pequena resistência térmica de R_{m-ab}) garante uma pequena diferença de temperatura entre o fluido e o absorvedor.

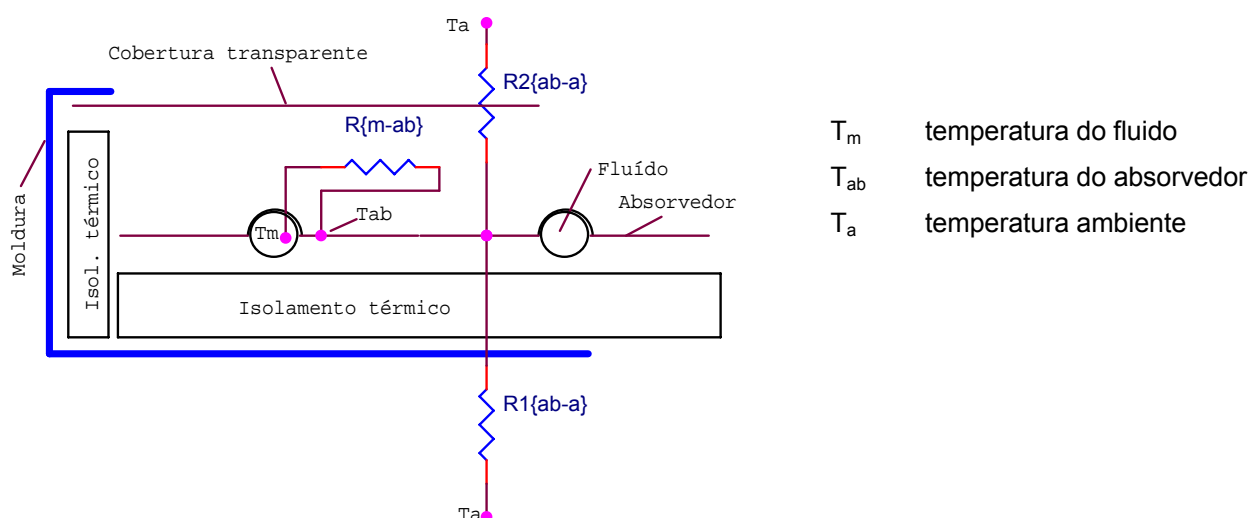


Figura 19 – Desenho esquemático do coletor com as resistências térmicas mais importantes por onde passa o fluxo de calor

Antes que o coletor possa gerar energia para um reservatório externo é necessário adicionar energia para aquecer a massa de cobre e a de água dentro do coletor.

No modelo de dois nós, como é demonstrado na figura 20, C_{ab} é a capacitância térmica do absorvedor e C_f é a capacitância térmica do fluido, as duas são normalizadas para a área de abertura A do coletor e expressas em $J/(m^2K)$.

A figura 20 ilustra o circuito elétrico equivalente aos elementos térmicos apresentados na figura 19. As duas capacitâncias térmicas da figura 20 são separadas pela resistência R_{m-ab} [m^2K/W]. As resistências térmicas entre o absorvedor e o ambiente são representadas por $R_{1,ab-a}$ [m^2K/W] e $R_{2,ab-a}$ [m^2K^2/W], sendo $R_{1,ab-a} = 1/k_1$ principalmente constituída por perdas de condução, que aparecem no isolamento térmico do coletor, e $R_{2,ab-a} = 1/k_2$ é constituída por perdas de convecção e de radiação, que aparecem entre o absorvedor e a cobertura e entre a cobertura e o ambiente (DUFFIE & BECKMANN, 1991, *chapter 6*). Considerando um bom contato térmico (exemplo conexão de solda) entre coletor e o tubo do fluido, a resistência térmica R_{m-ab} se torna desprezível.

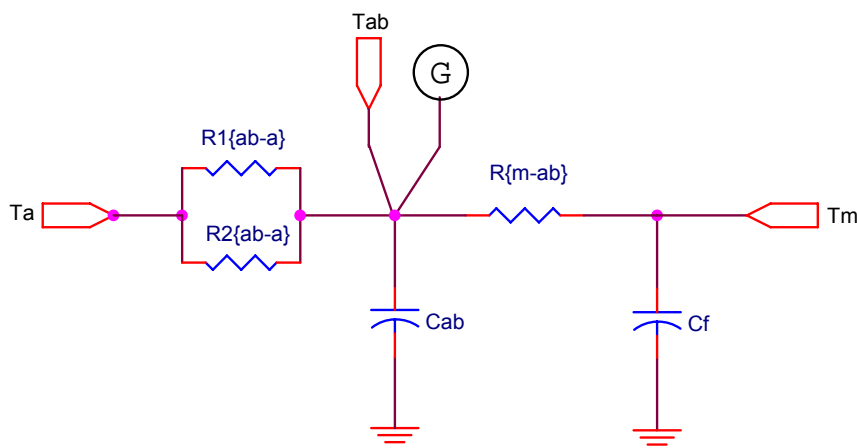


Figura 20 – Circuito elétrico equivalente ao circuito do coletor

Assim, o circuito equivalente (figura 20) pode ser simplificado e obtém-se o circuito ilustrado na figura 21, que representa o modelo utilizado para o QDT normatizado pela EN12975 (equação 128, pg. 209). Com este circuito, é simples contabilizar e normalizar as capacitâncias térmicas. Exemplo: O calor específico de água a $60^\circ C$ é de $4183 J/(kg K)$, o cobre tem uma capacitância térmica de $380 J/(kg K)$. Caso o absorvedor tenha $1 kg$ de cobre e contenha $1 kg$ de água por m^2 , obtém-se o valor de $(4183+380) J/(m^2 K)$ como capacitância térmica do coletor.

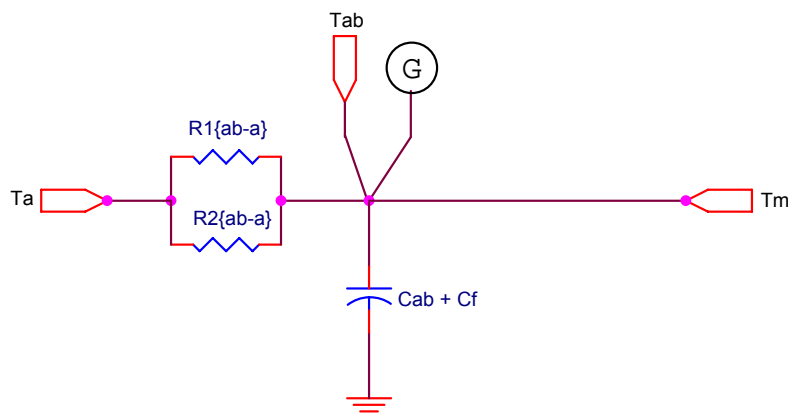


Figura 21 – Circuito elétrico simplificado equivalente ao circuito do coletor que é utilizado para ensaios de coletores

Sem capacitâncias térmicas, a energia na saída do coletor iria variar proporcionalmente à variação da potência da radiação solar. Neste caso, a correção com o modelo que interpreta as capacitâncias térmicas não seria necessária.

A energia Q_{cm} que a massa do absorvedor do coletor (incluindo a massa de água que ele contém) absorve por um intervalo de tempo é calculada com a equação a seguir:

$$Q_{cm} = (\dot{Q}_{cm}) \Delta\tau = \left(k_3 \frac{\Delta T_m}{\Delta\tau} \right) \Delta\tau = k_3 \Delta T_m \quad (128)$$

Onde $\Delta\tau$ é o tempo entre as duas medições e ΔT_m é a variação da temperatura média do absorvedor no intervalo $\Delta\tau$, \dot{Q}_{cm} é a potência térmica capacitiva correspondente à energia Q_{cm} do intervalo $\Delta\tau$, utilizada na equação (12), pg. 36 no modelo completo do coletor. k_3 é o coeficiente da capacitância térmica total do coletor [$J/(m^2K)$].

2 Modelo óptico do coletor solar

Para entender a dedução do modelo óptico utilizado no ensaio em regime quase dinâmico (item 2.2) são aqui introduzidos, de forma detalhada, os efeitos ópticos do coletor solar. O modelo óptico caracteriza: efeitos de transmissão da radiação solar pela cobertura, de absorção do absorvedor e de reflexão entre ambos os elementos.

Apesar das transmitâncias, absortâncias e refletâncias variarem em função do comprimento da onda, nos cálculos aqui apresentados são considerados valores médios destas variáveis, representativos para o espectro da radiação solar.

2.1 Transmitância considerando os efeitos de absorção de uma cobertura

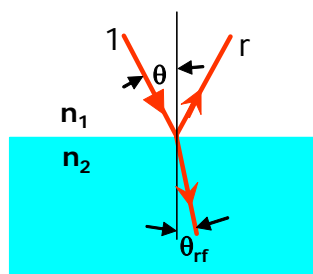
Quando os raios solares passam por um meio qualquer que não é idealmente transparente, este meio absorve uma parte desta radiação e a transforma em energia (lei de Bouguer). A transmitância τ_a , considerando somente os efeitos de absorção de uma cobertura (e não os de reflexão), é determinada pela equação que segue

$$\tau_a = \frac{G_t}{G_a} = e^{\left(-\frac{K L}{\cos\theta_{rf}} \right)} \quad (129)$$

onde G_t é a radiação solar transmitida pela cobertura e G_a é a radiação absorvida pela cobertura. K é o coeficiente de extinção, que varia em função do espectro solar, portanto, pode ser expresso com um valor médio para este espectro, cujo valor pode variar para vidros entre $K = (4 \text{ a } 32) \text{ m}^{-1}$ dependendo do grau da transparência desses (DUFFIE & BECKMANN, 1991) e L [m] é a espessura do vidro. O ângulo de refração θ_{rf} [°] (figura 22) é calculado com a lei descoberta por Snell, como mostra a equação que segue

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta_{rf})} \rightarrow \theta_{rf} = a \sin\left(\frac{n_2 \sin(\theta)}{n_1} \right) \quad (130)$$

Apesar do coeficiente de extinção variar em função do comprimento da onda nos cálculos aqui apresentados, considera-se valores médios destas variáveis, representativos para o espectro da radiação solar (DUFFIE & BECKMANN, 1991).



n_1 índice de refração para o ar,
 n_2 índice de refração do segundo meio,
 θ_{rf} ângulo de refração,
 r refletância.

Figura 22 – Ângulo de refração quando os raios solares passam do ar para um outro meio

2.2 Refletância da radiação na transição de um médio para o outro para ângulos normais

A refletância de uma interface (exemplo na transição dos raios solares do ar para vidro) para ângulos normais θ_n da incidência da radiação é calculada com a equação que segue

$$r(\theta_n) = \frac{G_r}{G} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (131)$$

onde G é a radiação total do sol, G_r a radiação refletida pela superfície, θ o ângulo de incidência entre sol e coletor solar, $n_1 \sim 1$ é o índice de refração do ar e n_2 é o índice de refração da cobertura (DUFFIE & BECKMANN, 1991, no capítulo 5. 1) que varia para vidros (do tipo *soda lime sílica glasses - clear bronze, grey, green*) em $n = (1,554$ a $1,494)$ no espectro solar terrestre de $(0,31$ a $2,5) \mu\text{m}$ (RUBIN, 1985). Para uma transição de ar para vidro, obteve-se a refletância r de $0,0434$, utilizando-se os valores de $n_1 = 1$ para o ar e $n_2 = 1,526$ como valor médio para vidros, que são utilizados também pelos autores (DUFFIE & BECKMANN, 1991).

2.3 Refletância da radiação na transição de um meio para outro para diferentes ângulos de incidência

Coberturas polarizam os raios solares refletidos e transmitidos por essas em dois estados de polarização quando os raios incidem em ângulos não normais. As

refletâncias r de uma cobertura para diferentes ângulos de radiação em relação ao coletor são calculadas segundo o autor DUFFIE & BECKMANN (1991, capítulo 5.2) com a equação que segue

$$r = \frac{G_r}{G} = \frac{G_{r,pe} + G_{r,pa}}{G} = \frac{(r_{pe} + r_{pa})}{2} \quad (132)$$

Onde G representa a radiação, chegando ao coletor G_r representando a radiação refletida, que consiste em dois estados de polarização das ondas da radiação, um estado perpendicular e outro paralelo. O coeficiente r_{pe} representa o componente polarizado perpendicular da radiação solar, r_{pa} representa o componente polarizado paralelo desta radiação. Ambos são calculados com a lei de Fresnel com as equações (133) e (134).

$$r_{pe} = \frac{\text{sen}^2(\theta_{rf} - \theta)}{\text{sen}^2(\theta_{rf} + \theta)} \quad (133)$$

$$r_{pa} = \frac{\tan^2(\theta_{rf} - \theta)}{\tan^2(\theta_{rf} + \theta)} \quad (134)$$

2.4 Transmissão de uma cobertura considerando somente efeitos de reflexão

Uma cobertura ideal não absorve a radiação solar, mesmo assim tem uma transmitância limitada por causa da reflexão nas duas interfaces que esta cobertura apresenta (figura 23).

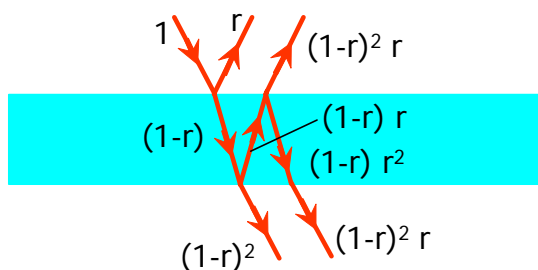


Figura 23 – Transmitância τ_r obtida de efeitos múltiplas de refletância r , que aparecem em uma cobertura sem consideração de efeitos de absorção nesta cobertura

A transmitância τ_r de uma cobertura, sem se considerar a sua absorção é calculada com a equação que segue

$$\tau_r = \frac{(\tau_{r,pe} + \tau_{r,pa})}{2} \quad (135)$$

onde a transmitância da radiação perpendicular $\tau_{r,pe}$ é calculada com a equação (136) e da radiação paralela $\tau_{r,pa}$ é calculada com a equação (137).

$$\tau_{r,pe} = \frac{1 - r_{pe}}{1 + r_{pe}} \quad (136)$$

$$\tau_{r,pa} = \frac{1 - r_{pa}}{1 + r_{pa}} \quad (137)$$

2.5 Transmitância τ_c de uma cobertura

Uma cobertura simples de um vidro é constituída de duas interfaces: uma do ar para o vidro e outra do vidro para o ar do coletor. Segundo os autores DUFFIE & BECKMANN (1991), a transmitância desta cobertura pode ser calculada com a equação que segue

$$\tau = \frac{(\tau_{pe} + \tau_{pa})}{2} \quad (138)$$

onde as transmitâncias dos componentes, perpendiculares $\tau_{c,pe}$ e paralelas $\tau_{c,pa}$ da radiação não polarizada, são calculadas com as equações (139) e (140) e onde a transmitância, considerando somente os efeitos de absorção no vidro τ_a , é calculada com a equação (129), pg. 210.

$$\tau_{c,pe} = \tau_a \times \frac{1 - r_{pe}}{1 + r_{pe}} \left(\frac{1 - r_{pe}^2}{1 - (r_{pe} \tau_a)^2} \right) = \tau_a \tau_{r,pe} \left(\frac{1 - r_{pe}^2}{1 - (r_{pe} \tau_a)^2} \right) \quad (139)$$

$$\tau_{c,pa} = \tau_a \frac{1 - r_{pe}}{1 + r_{pe}} \left(\frac{1 - r_{pa}^2}{1 - (r_{pa} \tau_a)^2} \right) = \tau_a \tau_{r,pa} \left(\frac{1 - r_{pa}^2}{1 - (r_{pa} \tau_a)^2} \right) \quad (140)$$

O coeficiente r_{pe} é a refletância perpendicular, que é calculada com a equação (133) e $\tau_{r,pe}$ representa a transmitância para uma cobertura ideal calculada com a equação (136). Igualmente, r_{pa} é calculado com a equação (134) e $\tau_{r,pa}$ é calculada com a equação (137).

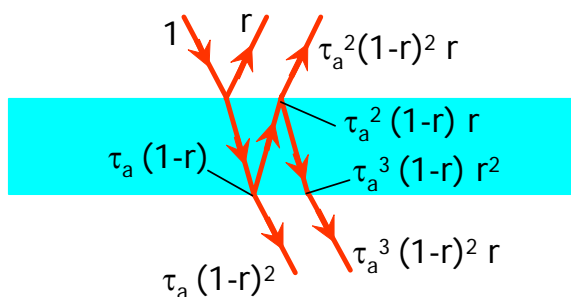


Figura 24 – Transmitância τ_c obtida de efeitos múltiplos de refletância r , que aparecem em uma cobertura considerando os efeitos de absorção τ_a nesta cobertura

2.6 Refletância ρ de cobertura

A refletância ρ para a cobertura de um vidro com duas interfaces é calculada com a equação (141) (DUFFIE & BECKMANN, 1991),

$$\rho = \frac{\rho_{pa} + \rho_{pe}}{2} \quad (141)$$

onde as refletâncias dos componentes, perpendiculares ρ_{pe} e paralelas ρ_{pa} , da radiação não polarizada são calculadas com as equações (142) e (143).

$$\rho_{pe} = r_{pe} + \frac{(1 - r_{pe})^2 \tau_a^2 r_{pe}}{1 - (r_{pe} \tau_a)^2} = r_{pe} (1 + \tau_a \tau_{r,pe}) \quad (142)$$

$$\rho_{pa} = r_{pe} + \frac{(1 - r_{pa})^2 \tau_a^2 r_{pa}}{1 - (r_{pa} \tau_a)^2} = r_{pa} (1 + \tau_a \tau_{r,pa}) \quad (143)$$

2.7 Absortância α de cobertura de uma cobertura real

A absortância α para a cobertura simples de só um vidro, que possui duas interfaces, é calculada com a equação (144), (DUFFIE & BECKMANN, 1991),

$$\alpha = \frac{\alpha_{pa} + \alpha_{pe}}{2} \quad (144)$$

onde as absortâncias dos componentes, perpendiculares α_{pe} e paralelas α_{pa} da radiação não polarizada, são calculadas com as equações (145) e (146).

$$\alpha_{pe} = (1 - \tau_a) \times \left(\frac{1 - r_{pe}}{1 - r_{pe} \times \tau_a} \right) \quad (145)$$

$$\alpha_{pa} = (1 - \tau_a) \times \left(\frac{1 - r_{pa}}{1 - r_{pa} \times \tau_a} \right) \quad (146)$$

A soma da transmitância com a refletância e a absortância resulta na unidade, como mostra a equação que segue

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (147)$$

Para uma cobertura de $L = 4$ mm de espessura, índice de refração de $n_2 = 1,526$ e coeficiente de extinção $K = 32 \text{ m}^{-1}$ obtêm-se características calculadas e representadas na figura 25 para τ , ρ e α . Observa-se que a absortância basicamente não varia o seu valor com θ situado na faixa de (0 a 60)°.

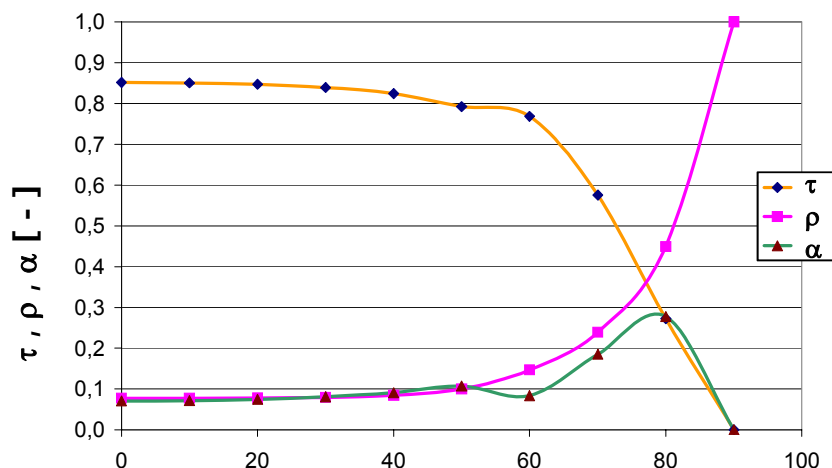


Figura 25 –Transmitância τ_c , refletância ρ , e absorptância α em função do ângulo de incidência θ para uma cobertura não ideal de um único vidro

Considerando a absorptância e a refletância em relação aos raios solares, quando estes passam pelo vidro, como os fatores indesejados que são responsáveis pelas perdas, a transmitância, que é complementar aos dois, expressa a efetividade do vidro em relação à radiação solar.

2.8 Absortância da superfície seletiva do absorvedor

A absorptância α para uma superfície é, segundo a lei de Kirchhoff, calculada com $\alpha = \varepsilon = 1 - \rho$, onde ρ é a refletância desta e ε é a emitância. O equilíbrio demonstrado por Kirchhoff deve ser aplicado para cada comprimento de onda, do espectro visível até o infravermelho, para se fazer um balanço total de energia do coletor.

98% da energia da radiação solar têm comprimento menor que $3 \mu\text{m}$. Uma superfície de corpo negro de $200 \text{ }^\circ\text{C}$ emite menos que 1% em comprimento de onda menor que $3 \mu\text{m}$. Estas características são aproveitadas na construção de coletores solares, através da deposição de uma camada seletiva, que tem este nome por ter uma refletância ρ baixa, de aproximadamente 0,1 para a radiação visível e ultravioleta ($< 3 \mu\text{m}$ de comprimento de onda) e uma refletância alta de aproximadamente 0,95 (que corresponde a uma baixa emitância) para radiações infravermelhas ($> 3 \mu\text{m}$ de comprimento de onda). Para coletores, são utilizadas tipicamente superfícies com o valor de $\alpha = (0,81 \text{ a } 0,95)$ e $\varepsilon = (0,09 \text{ a } 0,17)$ (DUFFIE & BECKMANN, 1991). Exemplo: Um coletor com uma camada de níquel preto tem

um α médio de 0,95 para radiações menores que $3 \mu\text{m}$ e um ε médio de 0,09 para radiações maiores de $3 \mu\text{m}$.

2.9 Efeitos do ângulo de incidência θ para a absorptância do absorvedor

Observando uma superfície sem cobertura (coletor para aquecimento de fluidos de baixas temperaturas – aquecimento de piscinas) obtém-se para ângulos de $\theta = 0^\circ$ a absorptância α_n . Para α ângulos diferentes da normal, a absorptância α se reduz, por causa do aumento das reflexões. Segundo os autores DUFFIE & BECKMANN (1991), ela é calculada com a equação que segue

$$\alpha = \alpha_n \left(1 + 2,0345 \cdot 10^{-3} \theta - 1,99 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 5,324 \cdot 10^{-6} \theta^3 - 4,799 \cdot 10^{-8} \theta^4 \right) \quad (148)$$

2.10 Absorptância do absorvedor e transmitância da cobertura reduzida para um único valor de $(\tau\alpha)$ para radiação direta

Efeitos de transmitância τ da cobertura e absorptância α do absorvedor podem ser expressos em um conjunto de $\tau\alpha$.

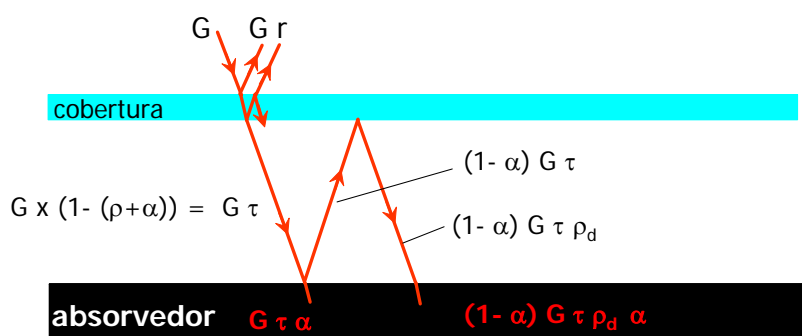


Figura 26 – Efeitos combinados que atuam em um coletor solar; legenda: radiação solar G , refletância sem considerar efeitos de absorção r , transmitância da cobertura τ , refletância a radiação difusa de uma cobertura ρ_d , absorptância do absorvedor ($\alpha = 1 - \rho_a$)

Quando a radiação solar G passa pela cobertura, ela é reduzida com a transmitância $G \tau_c$ do vidro (figura 26) e a parte absorvida pelo absorvedor é de $G \alpha \tau$. A parte refletida é de $(1 - \alpha) G \tau$, onde $(1 - \alpha)$ determine a refletância ρ_a do absorvedor. Esta

parte chega de forma difusa na superfície interna da cobertura e é refletida neste local de novo com $G(1-\alpha)\tau \rho_d$ até que volte para o absorvedor e ali é absorvida uma segunda parte que é de $G(1-\alpha)\tau \rho_d \alpha$. Este processo continua infinitamente e o coeficiente da transmitância e absortância total ($\tau\alpha$) é calculado com a equação (149) (DUFFIE & BECKMANN, 1991, capítulo 5.5).

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [\rho_a \rho_d]^n = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha) \rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha) \rho_d} \quad (149)$$

onde τ é a transmitância do vidro, α é a absortância do absorvedor e ρ_d é a refletância da cobertura da radiação difusa, obtida através da equação (141) e utilizando um ângulo médio de $\theta = 60^\circ$ para esta radiação.

O coeficiente de transmitância e absortância para ângulos diferentes de $\theta = 0^\circ$ é reduzido por efeitos de reflexão e isto faz com que a eficiência η_0 apresentada na equação (7), pg. 32 seja reduzida através deste efeito. É introduzido um fator de redução $(\tau\alpha)_\theta/(\tau\alpha)_n$ DUFFIE & BECKMANN (1991), que é igual a 1 quando $\theta = 0^\circ$, caso em que η_0 não é reduzido. Na norma EN12975 $(\tau\alpha)_\theta/(\tau\alpha)_n$ é denominado $(\tau\alpha)_{e\theta}/(\tau\alpha)_{en}$, onde o índice e indica a transmitância e absortância efetiva ou medida de um coletor em que é realizado um ensaio.

Características de $(\tau\alpha)_{e\theta}/(\tau\alpha)_{en}$ em função do ângulo θ para diferentes coberturas foram apresentados por KLEIN (1974) e são reproduzidos na figura 27. Esse autor descobriu que o valor de $(\tau\alpha)_\theta/(\tau\alpha)_n$, pode ser expresso com a equação que segue

$$\frac{\tau\alpha_{e\theta}}{\tau\alpha_{en}} = K_{\theta b}(\theta) = \left(1 + b_0 \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \right) \quad (150)$$

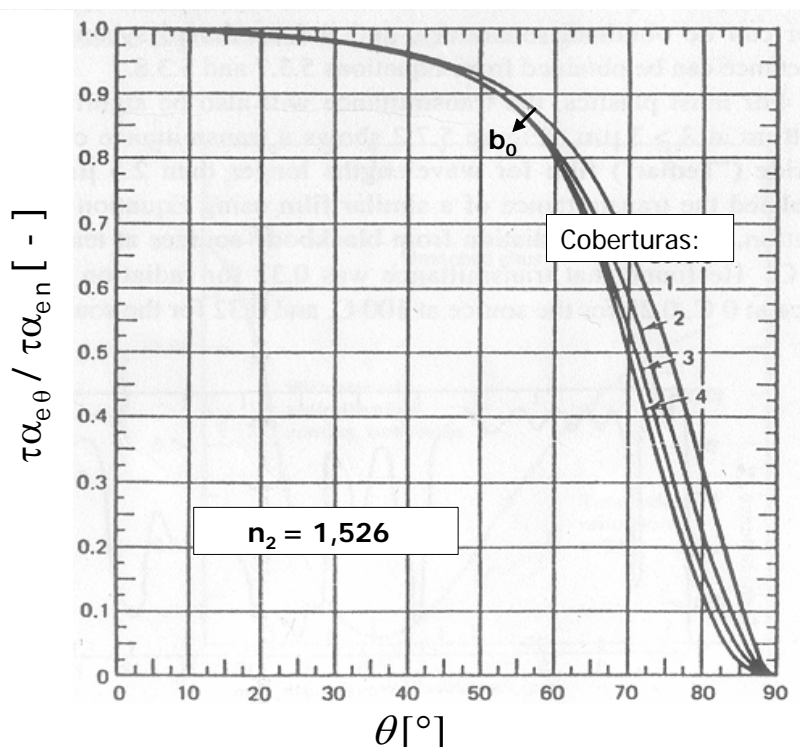


Figura 27 – Característica de $(\tau\alpha)_{e\theta}/(\tau\alpha)_{en}$ típica para (1 a 4) coberturas do coletor com o índice de refração médio de 1,526

DUFFIE & BECKMANN (1991) comentam que os efeitos de absorção e transmissão em conjunto podem ser calculados com esta função para o ângulo θ entre (0 e 60)° com uma boa aproximação (erro menor que 1 %), onde θ é o ângulo de incidência e b_0 é um fator de escala que faz um ajuste da curva de $(\tau\alpha)_{e,\theta b}/(\tau\alpha)_{e,n}$ para diferentes combinações de absorvância do absorvedor, transmitância da cobertura e quantidade de coberturas. A energia da radiação direta é assim obtida através da equação que segue

$$\dot{Q}_b = \eta_0 K_{\theta b}(\theta) G_b \quad (151)$$

Por questões estéticas, a maioria dos fabricantes fixa os tubos embaixo do absorvedor, portanto, ocorre um pequeno aumento do produto de $(\tau\alpha)_e$, por efeitos de dupla absorção (figura 28). Desta forma, pode-se observar nesta figura que, através da dupla absorção de um raio solar, a eficiência de um coletor pode ser aumentada.

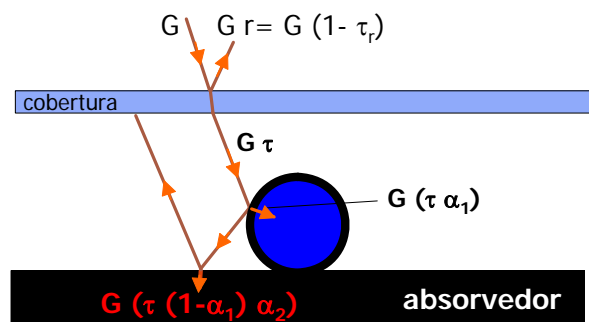


Figura 28 – Efeitos combinados que atuam em um coletor solar com tubo montado acima do absorvedor – legenda: refletância sem considerar efeitos de absorção r , transmitância τ , refletância a radiação difusa de uma cobertura ρ_d , absorvância do tubo α_1 , absorvância do absorvedor α_2

2.11 Transmitância e absorvância ($\tau\alpha$) para a radiação difusa

Atualmente, em ensaios de coletores, assume-se um céu isotrópico, onde todos os segmentos do seu hemisfério são emitidos por parcelas da radiação difusa que possuem a mesma intensidade. Não existe assim um ângulo específico para a radiação difusa, e a relação de $K_{\theta_d} = (\tau\alpha)_{\theta_d}/(\tau\alpha)_{\theta_{en}}$ é obtida através de um ângulo de incidência equivalente para a radiação difusa θ_{ed} , obtido através de um equivalente para todos os ângulos da esfera do céu. Varia-se o ângulo de inclinação β do coletor (ex. em um novo ensaio), obtém-se um outro K_{θ_d} , que é calculado com a equação (152) (DUFFIE & BECKMANN, 1991, capítulo 5.4). Esta variação é obtida por causa da redução do ângulo de visão com um aumento da inclinação do coletor,

$$\theta_{ed} = 59,7 - 0,1388 \beta + 0,001497 \beta^2 \quad (152)$$

onde θ_{ed} nessa equação é um equivalente da radiação direta. Obtendo-se o ângulo θ_{ed} , pode-se assim calcular a relação $(\tau\alpha)_{\theta_d}/(\tau\alpha)_{\theta_{en}}$ com a equação (150), substituindo θ por θ_{ed} . Para o ângulo de inclinação do coletor de $\beta = 29^\circ$, obtém-se um ângulo equivalente de $\theta_{ed} = 56,93^\circ$, que corresponde a um K_{θ_d} de 0,8792, utilizando um coeficiente de $b_0 = -0,145$. Este valor está dentro da faixa e é obtido pela regressão, como é posteriormente apresentado por $K_{\theta_d} = 0,875 \pm 0,035$.

Na regressão multilinear, posteriormente apresentada, $K_{\theta d}$ é obtido como coeficiente de regressão e pode ser comparado assim com a utilização das equações (150) e (152). A energia da radiação difusa é obtida através da equação que segue

$$\dot{Q}_d = \eta_0 K_{\theta d} G_d \quad (153)$$

2.12 Transmitância e a absorptância ($\tau\alpha$) para a radiação refletida

DUFFIE & BECKMANN (1991) apresentam, para a radiação refletida do chão ou de obstáculos menores em frente ao coletor, uma sistemática comparável com a apresentada no item 2.11. O ângulo equivalente θ_{er} é calculado com a equação que segue

$$\theta_{er} = 90 - 0,5788 \beta + 0,002693 \beta^2 \quad (154)$$

Substituindo θ por θ_{er} , calcula-se $K_{\theta r}$. Nos ensaios de coletores, a radiação refletida pelo chão não é medida, conseqüentemente, o coeficiente de $K_{\theta r}$ não pode ser obtido através da regressão. Como esta radiação é medida tanto com transdutor da radiação global, como com o transdutor da radiação difusa, ela é tratada como radiação global e pode gerar erros nas medições do ensaio quase dinâmico.

A energia da radiação difusa é obtida através da equação que segue

$$\dot{Q}_d = \eta_0 K_{\theta r} G_r \quad (155)$$

APÊNDICE 6: LISTA DE FABRICANTES DOS EQUIPAMENTOS

- a. Criostato: *Lauda*, Alemanha
- b. Filtro de água: LBR1 CUNO LATINA LTDA;
- c. Inversor de frequência: *Motorcon* Brasil
- d. Tubulações da estrutura da bancada: *Zinca Rapido* Florianópolis
- e. Isolamento térmico *ARMAFLEX*TM: *Termobras*
- f. Ventilador radial em aço inox (cortina de ar) *CSV-Refri*
- g. Piranômetros: *Kipp&Zonen* Holanda
- h. Transdutor de temperatura: *IOPE*, Brasil
- i. Medidor de vazão: *Krohne* : Alemanha e *Conaut* Brasil
- j. Anemômetro: *Thies* Alemanha
- k. Sistema de medição: *Agilent (Hewlet Packard)* Brasil

APÊNDICE 7: LOCALIZAÇÃO DOS PADRÕES

- A Piranômetro CM22 - *LABSOLAR*
- B Transdutor de temperatura V-Pt100 - *CERTI*
- C Balança 3101 (para calibrar o transdutor de vazão) - Empresa *CONAUT*
- D Multifunction Calibrator modelo 9100 da Wavetek/Datron (para calibrar o sistema de medição) - *CERTI*

ANEXO1: ESPECIFICAÇÕES E CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES E DAS UNIDADES DE MEDIÇÃO

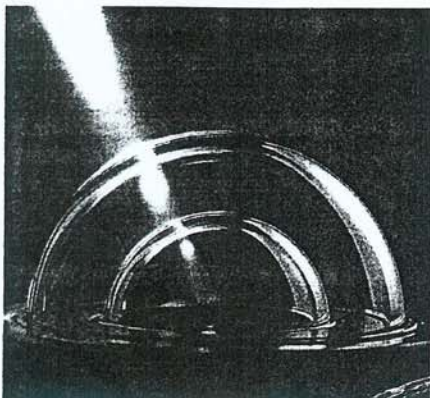
- Especificação do piranômetro utilizado para a medição *CM10 / CM11* e do *piranômetro CM22 utilizado como padrão na calibração do piranômetro CM11*, 2p. **224**
- Certificado de calibração do piranômetro padrão *CM22*, 3p. **226**
- Especificação do transdutor de temperatura (*PT100, Modelo 31900*) utilizado para a medição, 4p. **229**
- Certificado de calibração do padrão *V-PT100* utilizado para a calibração do modelo *31900*, 3p. **233**
- Especificação do medidor de vazão *IFS4000KC* utilizado para a medição da vazão, 1p. **236**
- Certificado de calibração do medidor *IFS4000KC*, 1p. **237**
- Especificação do SHUNT de precisão utilizado para transformar a corrente de (4 a 20)mA do *IFS4000KC*, 1p. **238**
- Especificação do anemômetro de copo modelo *4.330322* utilizado para a medição, 1p. **239**
- Especificação do anemômetro de hélice modelo *05305* utilizado para a calibração, 4p. **240**
- *Especificação da unidade de medição utilizada no ensaio HP34970A*, 3p. **244**
- Certificado de calibração do sistema de calibração *9100-Multifunction-calibrator* utilizado para calibrar o sistema de medição *HP34970A*, 5p. **247**



**Kipp &
Zonen**

CM Series

PYRANOMETER RANGE



features:

According to the ISO 9060 / WMO standards

Secondary standard (CM 11, CM 21, CM 22)

First class (CM 6B)

Second class (CM 3)

Reliable all weather performance

The widest range of pyranometers and accessories available

Kipp & Zonen pyranometers for atmospheric research and industry

Pyranometers are radiometers designed for measuring the irradiance on a plane surface resulting from radiant fluxes in the wavelength range from 0.3 to 3 micrometers, normally from solar radiation and lamps.

Kipp & Zonen has been manufacturing pyranometers for over 70 years. The instruments are used in meteorological research, solar energy research, material testing, climate control in greenhouses, building physics science and many other applications.

Kipp & Zonen can supply a full range of pyranometers and accessories, according to the ISO 9060 and World Meteorological Organisation (WMO) standards. The specifications of the various types of pyranometers are shown in the table on the rear page.

Common characteristics of Kipp & Zonen pyranometers are the robustness, and all weather performance. Pyranometers are easy to use, require no power, and are all supplied with calibration certificates that are traceable to WRR (World Radiometric Reference).

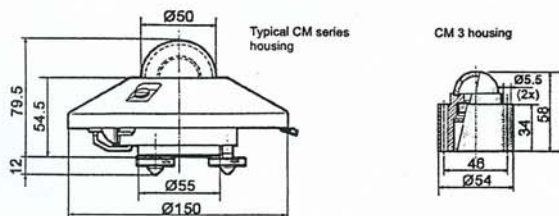
In the range of secondary standard pyranometers, Kipp & Zonen supplies equipment with special features; a record breaking response time, exceptional levelling accuracy and a test certificate also covering the directional response. These important parameters ensure the highest accuracy measurements.

SOLAR & ATMOSPHERIC SCIENCE



CM Series

PYRANOMETER RANGE



Note: The performance specifications quoted are worst-case and/or maximum values

Kipp & Zonen B.V. reserve the right to alter specifications of the equipment described in this documentation without prior notice

SPECIFICATIONS

	CM 22	CM 21	CM 11	CM 6B	CM 3
ISO CLASSIFICATION / WMO CLASSIFICATION	Secondary Standard High Quality	Secondary Standard High Quality	Secondary Standard High Quality	First Class Good Quality	Second Class Moderate Quality
Response time (95 %)	5 s	5 s	12 s	18 s	18 s
Zero offsets					
(a) thermal radiation (200 W/m ²)	± 3 W/m ²	± 7 W/m ²	± 7 W/m ²	± 15 W/m ²	± 15 W/m ²
(b) temperature change (5 K/hr)	± 1 W/m ²	± 2 W/m ²	± 2 W/m ²	± 4 W/m ²	± 4 W/m ²
Non stability (change/year)	± 0.5 %	± 0.5 %	± 0.5 %	± 1 %	± 1 %
Non linearity (0 - 1000 W/m ²)	± 0.2 %	± 0.2 %	± 0.6 %	± 1.2 %	± 2.5 %
Directional error (at 1000 W/m ²)	± 5 W/m ²	± 10 W/m ²	± 10 W/m ²	± 20 W/m ²	± 25 W/m ²
Temperature dependence of sensitivity	± 0.5 % (-20 to +50 °C)	± 1 % (-20 to +50 °C)	± 1 % (-10 to +40 °C)	± 2 % (-10 to +40 °C)	± 6 % (-10 to +40 °C)
Tilt response (at 1000 W/m ²)	± 0.2 %	± 0.2 %	± 0.2 %	± 1 %	± 2 %
OTHER SPECIFICATIONS					
Sensitivity (µV/W/m ²)	7 - 14	7 - 17	4 - 6	9 - 15	10 - 35
Impedance	10 - 100 Ω	40 - 100 Ω	700 - 1500 Ω	70 - 100 Ω	100 - 200 Ω
Level accuracy	0.1°	0.1°	0.1°	0.5°	1°
Operating temperature	-40 to +80 °C	-40 to +80 °C	-40 to +80 °C	-40 to +80 °C	-40 to +80 °C
Cable length	10 m	10 m	10 m	10 m	10 m
Spectral range (50 % points)	200 - 3600 nm	305 - 2800 nm	305 - 2800 nm	305 - 2800 nm	305 - 2800 nm
Typical signal output for atmospheric applications	0 - 25 mV	0 - 25 mV	0 - 10 mV	0 - 25 mV	0 - 50 mV
Maximum irradiance	4000 W/m ²	4000 W/m ²	4000 W/m ²	2000 W/m ²	2000 W/m ²
Expected daily accuracy	± 1 %	± 2 %	± 3 %	± 5 %	± 10 %
Recommended applications	Scientific research requiring the highest level of measurement accuracy and reliability	Meteorological networks, reference measurements in extreme climates, polar or arid	Meteorological networks, solar energy collector testing, materials testing	Good quality measurements for greenhouse climate control, field testing	Economical solution for routine measurements in weather stations

Options

- Cable extension (5,10,15, 20, 25,100 m) 1,2,3,4,5)
- Connector to extended cable 1,2,3,4,5)
- Various Filter Domes 2,3,4)
- Incorporated temperature sensor, Pt-100 or 10K thermistor 1,2,3)

1) for CM 22 2) for CM 21 3) for CM 11 4) for CM 6B 5) for CM 3

Accessories

- CV 2 Ventilation System 1,2,3,4)
- 2AP Suntracker and Positioner 1,2,3,4)
- CLF 1 levelling fixture 5)
- CM 121B Shadow Ring 1,2,3,4) CLF 1 required for 5)
- SOLRAD Integrator and dataloggers 1,2,3,4,5)
- Various albedo mounting plates 1,2,3,4,5)

SOLAR & ATMOSPHERIC SCIENCE



**Kipp &
Zonen**

WWW.KIPPZONEN.COM

Kipp & Zonen B.V.

Röntgenweg 1 2624 BD Delft
P.O. Box 507 2600 AM Delft
The Netherlands

T +31(0)15 2698 000

F +31(0)15 2620 351

E info.holland@kippzonen.com

Your local dealer:



Kipp & Zonen B.V.
 Röntgenweg 1 2624 BD Delft
 P.O. Box 507 2600 AM De'ft
 The Netherlands
 T +31-(0)15-2698000
 F +31-(0)15-2620351
 E info.holland@kippzonen.com
 Website www.kippzonen.com

CALIBRATION CERTIFICATE

PYRANOMETER

PYRANOMETER MODEL : CM 22
 SERIAL NUMBER : 020072
 SENSITIVITY (at normal incidence, 22 °C) : 8.87 $\mu\text{V/W/m}^2$
 REFERENCE PYRANOMETER : Kipp & Zonen CM22 REF2 active from januari 10, 2002.

CALIBRATION PROCEDURE

The reference and test pyranometers are mounted horizontally on a table that can rotate to exchange the positions of both instruments. A 1000W Tungsten-halogen filament lamp produces a directed vertical beam (divergence 3.5°). The irradiance at the pyranometers is approx. 500 W/m². The indoor procedure is based on a sequence of simultaneous readings. Because test and reference pyranometer are of the same model, the indoor conditions have at principle no influence on the transfer of calibration. The Kipp & Zonen procedure is described in the International Standard ISO 9847, Annex A.3. i.

HIERARCHY OF TRACEABILITY OF THE REFERENCE PYRANOMETER

This pyranometer has been compared with the "reference radiometers" at the World Radiation Center (WRC) in Davos. Global radiation data were obtained with the absolute cavity pyrhemometer PMO-2 (member of the WSG, WRR-Factor: 0.99955, based on the last International Pyrhemometer Comparison IPC-2000) and a continuous disk shaded pyranometer Eppley PSP-20655F3. All measurements were performed under mainly clear sky conditions, using the sun and sky radiation as source. The reference radiometers are periodically calibrated against the World Standard Group (WSG). The readings are referred to the World Radiometric Reference (WRR) as stated in the WMO Technical Regulations. The Davos site is 1588m above sea level at latitude 46.8143° and longitude -9.8458°.

*For this calibration, the inclinations of the receiver surfaces versus their horizontal position were set to 0.0 degrees, the instrument signal wire to the north. The instrument was mounted in a Kipp & Zonen CV 2 ventilation- and heater unit. The heater power of this CV 2 was set to 5 Watt. During the comparisons, the instrument received global radiation intensities from 622 to 944 with a mean of 812 W/m². The angle between the solar beam and the normal of the receiver surface varied from 29 to 50 with a mean of 38 degrees. The ambient temperature ranged from +13.0 to +24.8 with a mean of +21.0°C. The sensitivity calculation and its standard deviation is based on 960 individual measurements. Sensitivity in Davos was: 8.38 ± 0.05 $\mu\text{V/W/m}^2$. The testing was done July 31 and August 1, 2, 7, 14, 15, 16 and 22, 2001.

TRANSFER CORRECTIONS

1. A transfer correction for the directional error of -0.20 % was made for the CM 22 reference pyranometer. The correction to Kipp & Zonen conditions was necessary for measuring the vertical directed beam of the indoor calibration facility more accurately.

IN CHARGE OF TEST: F.de Wit

Date: 29/10/02

Kipp & Zonen, Delft, Holland



Kipp & Zonen B.V.
 Röntgenweg 1 2624 BD Delft
 P.O. Box 507 2600 AM Delft
 The Netherlands
 T +31-(0)15-2698000
 F +31-(0)15-2620351
 E info.holland@kippzonen.com
 Website www.kippzonen.com

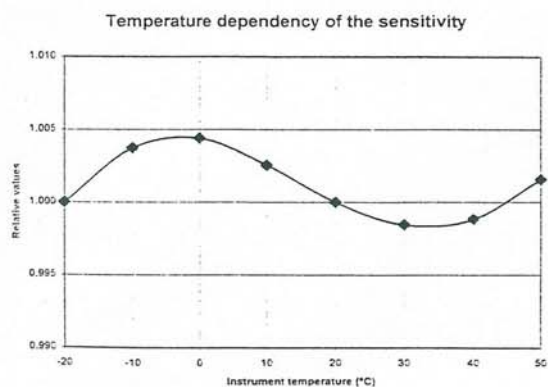
MEASUREMENT REPORT PYRANOMETER

Routine measurement of temperature dependency during final inspection

DATE of measurement : 23/10/02 08:34
 PERFORMED BY : F. de Wit
 PYRANOMETER TYPE : CM22
 Serial number : 020072

The pyranometer is mounted on a vertical table in the climate chamber. Outside the chamber a 250 W Tungsten-Halogen lamp, at a distance of 60cm, illuminates the pyranometer at normal incidence. During the test, the pyranometer is ventilated at a windspeed of 5 m/s.

The pyranometer is tested in a temperature range over 50 degrees/Celsius down to -20 degrees/Celsius in steps of 10 degrees/Celsius. The relative temperature dependency is plotted below.



T [C]	deviation [-]
50	1.002
40	0.999
30	0.998
20	1.000
10	1.003
0	1.004
-10	1.004
-20	1.000



Kipp & Zonen B.V.
 Röntgenweg 1 2624 BD Delft
 P.O. Box 507 2600 AM Delft
 The Netherlands
 T +31-(0)15-2698000
 F +31-(0)15-2620351
 E info.holland@kipzonen.com
 Website www.kipzonen.com

MEASUREMENT REPORT PYRANOMETER

Routine measurement of directional error during final inspection

Mean cosine error of each new pyranometer type CM22 is measured by a simple routine.

Routine:

The pyranometerbase is placed against the vertical turntable of a goniometer in the parallel (0,5°) beam of a sunsimulator.
 Voltage output U(z) is measured for beam incidence (zenith) angles of 0°, 40°, 60°, 70° and 80° coming in over azimuth South (cable pointing to North).
 Next the pyranometer output U(-z) is measured for incidence angles of -80°, -70°, -60°, -40° and 0° consequently for azimuth South. The dark signal is measured at the beginning of the routine in the middle and at the end. For each beam incident angle the dark signal is interpolated.

During the CM22 measurement cycle a check is done on the azimuth error at 40° and 70° by measuring voltages for azimuth-directions S, E, N and W. Also at -70° and -40° this azimuth error is measured and the mean of both azimuth measurements cancels out eventual error in the 0° position.

With the extended procedure at both 40° and -40° and 70° and -70° the specific cosine error for 8 azimuth directions (40° S, E, N, W and 70° S, E, N, W) can be calculated according to formula 1 and verified whether it is within $\pm 5W/m^2$.

The applied formula for the relative cosine error is:

U(0°) Pyranometer output voltage for normal incidence
 U(z) Pyranometer output voltage for angles (z)
 Zero(z) Dark signal for angles (z)

$$\frac{\frac{(U(z) - U(-z))}{2} - \text{zero}(z)}{\frac{(U(0^\circ) - U(0^\circ))}{2} - \text{zero}(z) \cdot \cos(z)}}{100\%} \quad \text{Formula 1.}$$

Relative cosine error at zenith angle

Zenith angle	South	East	North	West
40	0.08	-0.09	-0.53	0.37
60	0.95			
70	1.10	0.32	-0.06	0.55
80	1.96			

Absolute cosine error for 1000 W/m² beam radiation

Zenith angle	South	East	North	West
40	0.62	-0.69	-4.04	2.84
60	4.75			
70	3.77	1.10	-0.21	1.89
80	3.41			

Veja nosso Catálogo

Saiba Antes | Termometria | Termômetros | Termostatos | Transmissores | Infravermelhos



Característica da Termoresistência

A termoresistência de platina é a mais usada industrialmente devido a sua grande precisão e estabilidade. Convencionou-se chamar de Pt-100, a termoresistência de platina que apresenta uma resistência ôhmica de 100Ω a 0°C . Sua faixa de trabalho vai de -200 a 650°C , porém a ITS-90 padronizou seu uso até aproximadamente 962°C .

Os limites de erros da Pt-100 são referentes às normas DIN-IEC 751/85. Um valor típico de alfa $p/R100=138,50\Omega$ é de $3,850 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Nota: A norma DIN-IEC 751/85 é a unificação da DIN-43760/80 com a IEC-751/83, atendendo também a BS-1904/84.

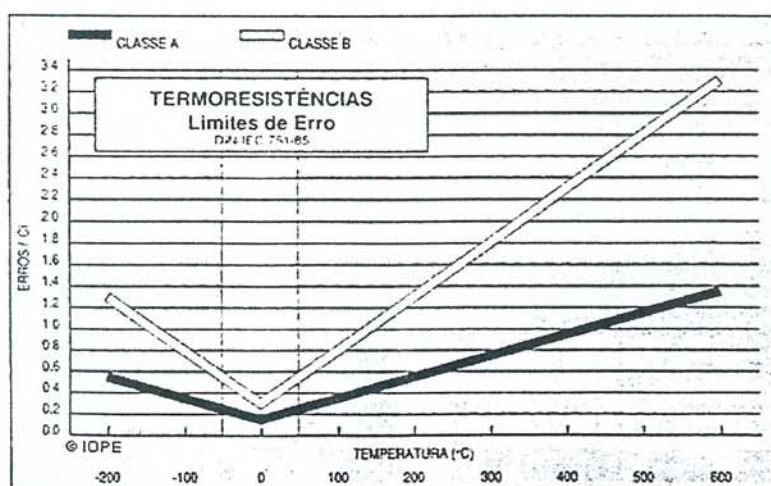
Limites de Erros da Termoresistência Pt-100:

Apresentamos os limites de erros para as classes A e B segundo a norma DIC-IEV 751/85:

CLASSE B $\pm 0,30 + (0,005 \cdot t)^\circ\text{C}$
 CLASSE A $\pm 0,15 + (0,002 \cdot t)^\circ\text{C}$

Numericamente e graficamente temos:

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Tolerância	
	Classe A ($\pm^\circ\text{C}$)	Classe B ($\pm^\circ\text{C}$)
-200	0,55	1,3
-100	0,35	0,8
0	0,15	0,3
100	0,35	0,8
200	0,55	1,3
300	0,75	1,8
400	0,95	2,3
500	1,15	2,8
600	1,35	3,3
650	1,45	3,55



Veja nosso Catálogo

Resistência de Isolação a Temperatura ambiente

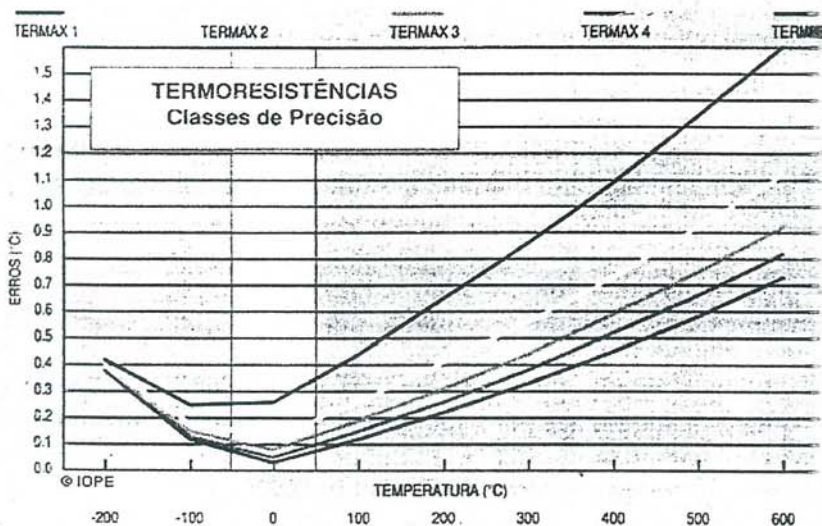
A resistência entre cada terminal e a bainha deve ser testada com uma voltagem entre 10 a 100 VDC, sob temperatura ambiente entre 15°C a 35°C e umidade relativa não excedendo a 80%. Em todos os casos, a resistência de isolamento mínima é 100M.

Medição a 2,3 e 4 fios

Na medição de temperatura com termoresistência a 2 fios, temos uma distância limitada entre o sensor e o instrumento receptor, dada pela bitola dos condutores. Já a 3 ou 4 fios, esta distância é praticamente ilimitada.

Existem também bulbos de resistências com graus de precisão superiores às classes A e B. Estes sensores são termoresistências de platina e apresentam um grau de pureza altíssimo, encapsulados de forma a não criarem pontos de contato. Chamamos estes sensores de TERMAX (termoresistência de máxima precisão) e estas se dividem em TERMAX 1, TERMAX 2, TERMAX 3, TERMAX 4 e TERMAX 5.

Estas subdivisões estão relacionadas ao grau de precisão sendo o TERMAX 5 a termoresistência de maior precisão existente no mercado, sendo muitas vezes utilizada como padrão de temperatura em indústrias e laboratórios. Apresentamos a seguir a curva dos limites de erros das termoresistências Pt-100 TERMAX 1 até TERMAX 5.



P

Numericamente, apresentamos os limites de erros das termoresistências Pt-100 Classe A e B, TERMAX 1, TERMAX 2, TERMAX 3, TERMAX 4 e TERMAX 5 em °C:

°C	CLASSE A	CLASSE B	TERMAX 1	TERMAX 2	TERMAX 3	TERMAX 4	TERMAX 5
-200	0,55	1,30	0,42	0,40	0,39	0,39	0,38
-100	0,35	0,80	0,25	0,18	0,15	0,13	0,12
0	0,15	0,30	0,26	0,13	0,08	0,05	0,04
+100	0,35	0,80	0,44	0,26	0,19	0,15	0,13
+200	0,55	1,30	0,65	0,41	0,31	0,26	0,23
+300	0,75	1,80	0,86	0,56	0,44	0,38	0,33
+400	0,95	2,30	1,09	0,73	0,59	0,52	0,45
+500	1,15	2,80	1,34	0,92	0,75	0,66	0,57
+600	1,35	3,30	1,60	1,12	0,92	0,82	0,70

Existem também outros tipos de termoresistência que são o Pt-500, Pt-1000, Pt-10, Pt25,5, entre outros.

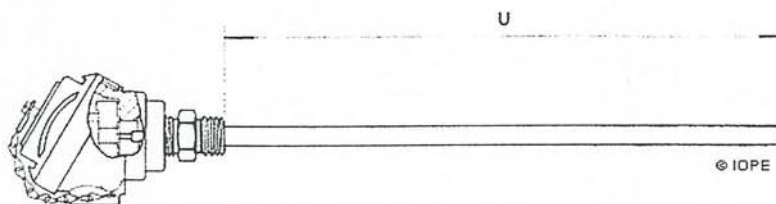
Para o Pt-500 a relação Temperatura x Resistência ôhmica deve ser a do Pt-100 multiplicada por 5, e para o Pt-1000 os valores da tabela do Pt-100 devem ser divididos por 2.

http://www.iope.com.br/p_temp_terminor_b.htm

Veja nosso Catálogo

TEMPERATURA

Saiba Antes | Termometria | Termômetros | Termostatos | Transmissores | Infravermelhos


Termoresistência com Bainha Preenchida - Série 31900
Séries: 30000 | 30800 | 30900 | 31000 | 31800 | **31900** | 36000 | 37000

Faça sua especificação no formulário abaixo e envie-nos o mesmo após confirmá-lo. Teremos o maior prazer em atender a sua empresa.

1 Série	Termoresistência com Bainha Preenchida com cabeçotes, especificar conforme a Série 31900. (item já especificado no campo ao lado).		Faça sua especificação 31900
2 Características do Sensor	I - PT-100 / Classe A Vidro II - PT-100 / Classe A Cerâmica III - PT-100 / Classe B Vidro IV - PT-100 / Classe B Cerâmica V - NI-100 Cerâmica VI - TERMAX (sob consulta) VII - Outros	Acrescentar D para sensor duplo, T para sensor triplo, ligação a 2 fios	Faça sua especificação III
3 Tipo de Ligação	2 - Ligação a 2 fios 3 - Ligação a 3 fios 4 - Ligação a 4 fios		Faça sua especificação 4
4 Diâmetro da Bainha	30 - 3,0 mm 47 - 4,7 mm 60 - 6,0 mm	80 - 8,0 mm 99 - Outros	Faça sua especificação 30
5 Material da Bainha	304 - Inox 304 310 - Inox 310 316 - Inox 316	600 - Alloy 600 999 - Outros	Faça sua especificação 00
6 Cabeçote	HU11 - Universal pequeno em alumínio HU21 - Universal grande em alumínio HX11 - Prova de tempo e explosão em alumínio HX22 - Prova de tempo e explosão em ferro HM11 - Miniatura em alumínio		Faça sua especificação HX22
7 Conexão ao Conduíte	12N - 1/2" NPT 14N - 1/4" NPT 34N - 3/4" NPT	12B - 1/2" BSP 14B - 1/4" BSP PC - Prensa Cabo	Faça sua especificação 34NPT
8 Conexão ao Processo	00 - Sem Conexão BA - Bucim ajustável BR - Bucim reajustável	PRR - Pote sextavado com rosca dupla ao cabeçote e processo	Faça sua especificação BA
9 Material	000 - Sem Terminal 303 - Inox 303	316 - Inox 316 500 - Latão Polido	Faça sua especificação

veja nosso Catálogo

da Conexão	304 - Inox 304		00
10 Rosca ao Processo	000 - Sem rosca 12N - 1/2" NPT 14N - 1/4" NPT	18N - 1/8" NPT 34N - 3/4" NPT 38N - 3/8" NPT	Faça sua especificação 34NPT
11 Comprimento Termores. "U"	Especificar em (mm)		Faça sua especificação 800
12 Opcionais	US - Unidade seladora para cabeçote a prova de tempo e/ou explosão BCM - Bloco de ligação com mola de compressão		Faça sua especificação
13 Para Casos Especiais	Acréscitar a letra E no final da codificação, indicando as modificações e anexando o(s) desenhos(s). Preencha o campo abaixo com informações complementares.		Faça sua especificação
<p>Nota: Outros tipos de cabeçotes, vide capítulo de acessórios.</p> <p>Preencha o campo abaixo caso queira acrescentar algo:</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>			

Clique no botão abaixo para confirmar os dados
preenchidos acima. Os dados serão confirmados no formulário horizontal a seguir:
(Antes de ENVIAR passe o mouse sobre cada número de especificação para visualizar suas características e conferir a
validade das informações)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
31900	11	4	30	00	HX22	34NPT	BA	00	34NPT	800		

Seu nome : _____
 Seu e-mail : _____
 Seu telefone : _____
 Assunto : Cotação Série 31900 - Termoresistência com Bainha Preenchida

Enviar cotação

Imprimir a página

© Copyright IOPE - Instrumentos de Precisão Ltda. - Todos os direitos reservados



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Inmetro



Certificado de Calibração

DIMCI 1443/2003
Número do Certificado

Solicitante do Serviço

Nome: FUNDAÇÃO CERTI

Endereço: Campus da UFSC, S/N - Setor C - Bairro Trindade - Florianópolis - SC - CEP 88040-970.

Identificação do Instrumento de Medição / Padrão Calibrado

Instrumento de Medição/Padrão: Termômetro de Resistência de Platina de 100Ω (PT-100)

Fabricante do Sensor: Visomes

Modelo/Tipo do Sensor: NÃO FORNECIDO

Número de Série do Sensor: V-PT100 - 4903 (Visomes)

Informações Administrativas

Processo Inmetro: 004563/2003

Data da Calibração: 25/09/2003

Laboratório Responsável pela Calibração: Laboratório de Termometria - Later

25/09/2003
Data de Emissão


Slavoljub Garcia Petkovic
Chefe Substituto da Divisão de Metrologia Térmica



O presente certificado de calibração atende aos requisitos da norma NBR ISO/IEC 17025:2001 e é válido apenas para o instrumento de medição/padrão acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral; reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo Inmetro.



Certificado de Calibração



DIMCI 1443/2003
Número do Certificado

Características do Instrumento de Medição / Padrão Calibrado

Diâmetro do sensor: 6 mm

Comprimento da haste sensora : 320mm

Tipo de conexão: 4 fios

Valor nominal: 100 Ω

Informações Pertinentes à Calibração

Faixa de Calibração: -39°C a 157°C

Profundidade média de Imersão : 200 mm

Último valor de R_0 medido com o termômetro já calibrado = 100,001 Ω

Procedimento / Método de Calibração

O TRP foi calibrado por comparação em banhos termostáticos na faixa de -39°C a 157°C contra um termômetro padrão de resistência de platina de 25 Ohms N/S 3713, calibrado no Inmetro. Os valores de resistência do pt-100 foram medidos através de uma ponte de resistência DC, com uma corrente de 1 mA, obtendo razões de resistência $W = R_x/R_0$ para cada temperatura determinada pelo padrão. Valores de W e t foram empregados para ajustar as equações $t(W) = A + B.W + C.W^2 + D.W^3$ e $W(t) = 1 + a.t + b.t^2 + c.t^3$, apresentadas neste certificado.

A escala empregada nesta calibração é a Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90).

R_x = Resistência em uma determinada temperatura.

R_0 = Resistência no ponto do gelo.



Certificado de Calibração


DIMCI 1443/2003

Número do certificado

Resultados e Declaração de Incertezas

Coeficientes para faixa de temperatura de -39°C a 157°C:	
Equação: $T(W) = A + B.W + C.W^2 + D.W^3$	
A =	-245,9864120
B =	237,1186138
C =	8,2936825
D =	0,5772106
Equação: $W(t) = 1 + a.t + b.t^2 + c.t^3$	
a =	3,914912E-03
b =	-6,063200E-07
c =	7,929290E-11

W(Rx/Ro)	Temp.med./°C
1,600 271	157,075
1,385 946	100,112
1,193 799	49,888
1,118 689	30,465
0,921 524	-19,981
0,846 972	-38,853

Incertezas por faixa de temperatura	
Faixa de temperatura	Incertezas/±°C (k=2)
-39°C até 157°C	0,026

$k = 2$, é o fator de cobertura para a incerteza expandida para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Aline Gonçalves da Silva
 Aline Gonçalves da Silva
 Técnica Executora

Slayolhub Garcia Petkovic
 Slayolhub Garcia Petkovic
 Chefe do Laboratório de Termometria

CONAUT**KROHNE**

PHÖNIX

CONTROLES AUTOMATICOS LTDA.

FOLHA DE DADOS			No. Prop.	04 / 0540 Rev. 1	FOLHA:	01 de 01		
MEDIDOR MAGNÉTICO DE VAZÃO								
CLIENTE:		FAPEL		REF	SOLICITAÇÃO DE ORÇAMENTO			
01	TAG				-			
02	SERVIÇO				-			
03	CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA				-			
04	DIÂMETRO DA LINHA				DN ¾"			
MEDIDOR (SENSOR)								
05	FAIXA DE VELOCIDADE				0,3 - 10 m/s			
06	FAIXA DE VAZÃO CALIBRADA				0 - 200 l/h			
07	DIÂMETRO / CLASSE / FACE			DN 6mm c/ conexões ½" (NOTA 1)	ANSI 150# - WAFER			
08	MATERIAL DO FLANGE				SEM FLANGES			
09	MATERIAL DO TUBO				AISI 304			
10	MATERIAL DO REVESTIMENTO				TEFLON			
11	MATERIAL DOS ELETRODOS				AISI 316L			
12	TIPO DOS ELETRODOS				PLANO - REMOVÍVEL COM A LINHA DESPRESSURIZADA			
13	PINTURA EXTERNA				PRIMER EPOXY MODIF. / ACAB. POLIURETANO ALIFÁTICO			
14	CLASSE DE PROTEÇÃO				IP 67			
15	CONEXÕES ELÉTRICAS				½" NPT			
16	ATERRAMENTO / PROTEÇÃO				ANÉIS DE ATERRAMENTO EM AISI 304			
CONVERSOR ELETRÔNICO								
17	MODELO				IFC 010			
18	CLASSIFICAÇÃO CONVERSOR				IP 65			
19	MATERIAL INVÓLUCRO				POLICARBONATO			
20	INDICAÇÃO (DISPLAY)				SIM, DIGITAL			
21	MONTAGEM				PAREDE			
22	ALIMENTAÇÃO				220 VAC / 60 HZ			
23	SINAL DE SAÍDA				4 - 20 mA + pulsos // HART			
24	INTERFACE P/ COMUNICAÇÃO				-			
25	PRECISÃO (DO VALOR MEDIDO)				0.5%			
26	CONEXÃO ELÉTRICA				½" NPT			
ACESSÓRIOS								
27	MANUAL DE INSTRUÇÕES				SIM			
28	ETIQUETA DE IDENTIFICAÇÃO				STANDARD			
29	COMPRIMENTO DO CABO				5 METROS			
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO								
30	FLUIDO	ESTADO FÍSICO		ÁGUA			LÍQUIDO	
31	VAZÃO MAX.	NORMAL	MINIMA	l/h	200	-	60	
32	PRESSÃO MAX	NORMAL	MINIMA	Kgf/cm²	INFORMAR	-	-	
33	TEMP. MAX	NORMAL	MINIMA	° C	100	-	5	
34	CONDUTIVIDADE MINIMA			µS/cm	5			
35	VISCOSIDADE			Cp	-			
36	CONSISTÊNCIA			%	-			
37	DENSIDADE			Kg/m³	-			
38	QUANTIDADE				01			
39	MODELO CONAUT / KROHNE :				IFS 4000 KC WAFER / F.TE.00.00.304.SS.RE.67.00.06 + IFC 020 F.D.2.65.00 - HART			
NOTAS :								
(1) Estamos ofertando medidor com diâmetro que melhor atende vazão informada.								
(2) Estamos ofertando Medidor Magnético de Vazão por não possuímos Rotâmetros com saída de pulso e nem na faixa de precisão desejada.								
REV.	0	A	B	C	D	E	F	G
DATA	26/01/04	22/04/04						
POR	RODRIGO	RODRIGO						

CONAUT**KROHNE**

PHÖNIX

PAG 1/1

CONTROLES AUTOMÁTICOS LTDA.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 04061237

CLIENTE: Fapeu

CONVERSOR		MEDIDOR	
MODELO	IFC020	MODELO:	IFS4000W/6
TAG:		TAG:	DIÂMETRO: 6mm
ALIMENTAÇÃO:	220 vac 60 Hz	VAZÃO CALIBRADA:	200 l/h
SINAL DE SAÍDA:	4 a 20 ma	CONSTANTE:	GK 5,4534
FREQ. DE EXCITAÇÃO:	10 Hz	REVESTIMENTO:	TEFLON
DAMPING:	10s	ELETRODOS:	HASTELLOY C
PROTEÇÃO	IP 65	ELETR. ATERRAMENTO:	
No. DE SÉRIE:	1311/04	MATERIAL DO TUBO:	AÇO INÓX 304
		MATERIAL DO FLANGE:	SEM FLANGES
		PADRÃO DO FLANGE:	ANSI 150# RF
		PROTEÇÃO:	IP 67
		No. DE SÉRIE:	1311/04

TESTE HIDROSTÁTICO: 20 Kgf / cm²

DURAÇÃO: 60 minutos

TESTE DE ISOLAÇÃO (500 V) BOBINAS: 1000 M ohm

ELETRODOS: 2000 M ohm

RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO

Padrão (l/h)	1a. Leitura (l/h)	2a. Leitura (l/h)	3a. Leitura (l/h)	Desvio Médio %
200,05	200,27	199,74	199,74	-0,07
150,05	149,95	149,98	149,83	-0,09
99,98	99,90	99,86	100,06	-0,04
50,08	50,04	49,96	50,00	-0,16
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Método utilizado: Conforme as Normas ISO 5168, ISO 8316, ISO 4185, NBR ISO/IEC 17025, IT / LAB / 002

Desvios em relação ao valor medido. Incertezas do ensaio: $\pm 0,11\%$

Influência da Temperatura: 0,1 % para cada 10 °C (Temperatura ambiente acima de 20 °C)

Padrão de trabalho No 2

Aparelho Calibrador:	MULTÍMETRO DIGITAL	Aparelho Calibrador:	BALANÇA	Aparelho Calibrador:	TERMÔMETRO DIGITAL
Modelo:	8050A	Modelo:	3101	Modelo:	CONNECT
Orgão Calibrador:	USP - IEE / RBC	Orgão Calibrador:	IPT / RBC	Orgão Calibrador:	SALCAS / RBC
No. Cert. Calibração:	55692	No. Cert. Calibração:	49964	No. Cert. Calibração:	0554/02 E 0555/02
Data De Venc.:	22 / 07 / 2005	Data De Venc.:	23/07/05	Data De Venc.:	30 / 07 / 2004

CALIBRADO POR:

Gustavo Petroni Rosa
 Gustavo Petroni Rosa
 TEC. INSTRUMENTAÇÃO


 Temperatura Ambiente **23 °C**
 Data: 09/06/04

Declaramos que este certificado só deve ser reproduzido por inteiro e com aprovação escrita do LABORATÓRIO CONAUT.

CERT002.DOC

CURS100 100 OHM CURRENT SHUNT TERMINAL INPUT MODULE

1.0 FUNCTION

Terminal input modules connect directly to the datalogger's input terminals to provide completion resistors for resistive bridge measurements, voltage dividers, and precision current shunts. The CURS100 converts a current signal (e.g., 4-20 mA) to a voltage that is measured by the datalogger. The 100 ohm resistor used for the current shunt allows currents up to 25 mA to be read on a ± 2500 mV range (CR10, CR10X) and currents up to 50 mA to be read on a ± 5000 mV range (21X, CR7, CR9000).

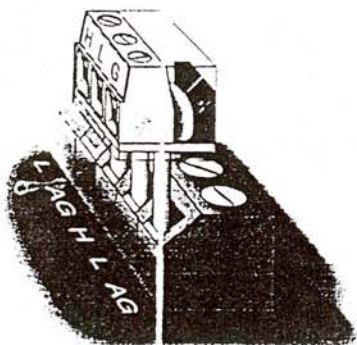


FIGURE 1-1. Terminal Input Module

2.0 SPECIFICATIONS

TABLE 2-1. Resistor Specifications

100 Ohm Shunt Resistor	
Tolerance @ 25 °C	$\pm 0.01\%$
Temperature coefficient	8 ppm/°C
Power rating	0.25 W

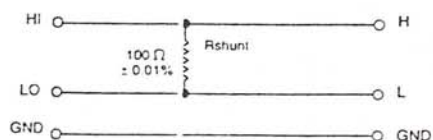


FIGURE 2-1. CURS100 Schematic

The CURS100 has three pins: high, low, and ground; these pins are the correct spacing to insert directly into the datalogger's high, low, and ground terminals (\neq on 21X, CR7, or CR9000 or AG on CR10).

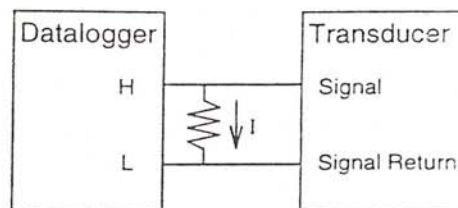
3.0 MEASUREMENT CONCEPTS

Transducers that have current as an output signal consist of three parts: a sensor, a current transducer (quite often integrated with the sensor), and a power supply. The power supply provides the required power to the sensor and transducer. The sensor signal changes with the phenomenon being measured. The current transducer converts the sensor signal into a current signal. The current output changes in a known way with the phenomenon being measured.

An advantage of current loop transducers over voltage output transducers is the current signal remains constant over very long leads.

Two disadvantages with current loop transducers are as follows. First, most transducers require constant current from the power supply, adding cost and size. Secondly, the conditioned output quality may not be as good as a similar unconditioned sensor being measured directly by a datalogger.

The output of the transducer is wired so the current must flow through the 100 ohm resistor in the CURS100.

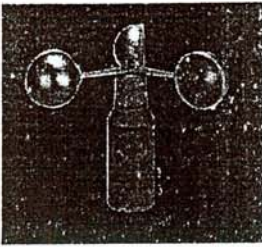
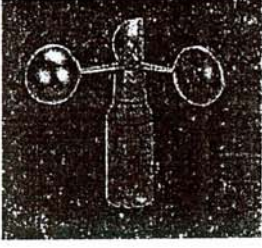
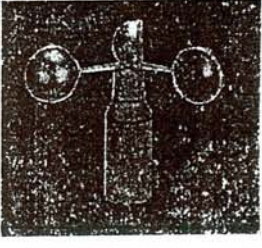
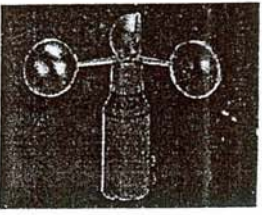


Ohm's law describes how a voltage (V) is generated by the signal current (I) through a completion resistor (R):

$$V = I (R).$$

This voltage is measured by the datalogger.

Wind Classic

Benennung	Bestell - Nr.	Technische Daten		
<p>Windgeber Der Windgeber dient zur richtungsunabhängigen Messung der horizontalen Luftströmung.</p> <p>Der Windgeber ist mit einer berührungsfreien optoelektronischen Abtastung ausgerüstet, die einen besonders leichten Anlauf bewirkt. Der Messwert wird als digitales Signal am Ausgang bereitgestellt.</p> <p>Die Heizung ist elektronisch geregelt. Eine Steckerverbindung befindet sich im Schaft des Gerätes. Die Montage erfolgt vorzugsweise auf einem Mast oder einer Traverse. Alle wesentlichen Teile bestehen aus eloxiertem Aluminium und sind zusätzlich lackiert.</p>	4.3303.22.xxx .000 .007	<p>Messbereich: Elektr. Ausgang (für Datalogger)</p> <p>Belastung Entfern.-Konstante Genauigkeit</p> <p>Betriebsspannung Elektronik Heizung</p> <p>Allgemein Umgebungstemp. Elektr. Anschluss bei x.xxxx.xx.000 bei x.xxxx.xx.007</p> <p>Montage Aufnahme Abmessung Gewicht</p>	<p>0,3 ... 50 m/s 3 ... 1042 Hz (live zero) 3 ... 1042 Hz (no live zero) max. 60 m/s 5 m $\pm 0,3 \text{ m/s} / \pm 2\% \text{ v. Mw.}$</p> <p>4...18 V DC 24 V AC/DC ; 20 W</p> <p>-35 ... +80°C</p> <p>5-polige Steckverbindung 7-polige Steckverbindung</p> <p>auf Mastrohr 1 1/2" Ø 50 x 50 mm Ø 315 x 230 mm 1 kg</p>	
<p>Windgeber Dieser Windgeber ist für hohe Windgeschwindigkeiten ausgelegt.</p>	4.3303.22.0xx 008 018	<p>Messbereich Elektr. Ausgang</p> <p>Genauigkeit</p> <p>Betriebsspannung Elektronik Heizung Elektr. Anschluss</p>	<p>0,5 ... 75 m/s 0 ... 754 Hz (live zero) 0 ... 754 Hz (no live zero) $\pm 0,5 \text{ m/s} / \pm 2\% \text{ v. Mw.}$</p> <p>4...18 V DC 24 V AC/DC ; 20 W 5-polige Steckverbindung</p>	
<p>Windgeber Der Windgeber ist mit einer berührungsfreien optoelektronischen Abtastung ausgerüstet. Eine nachfolgende Elektronik wandelt die geschwindigkeitsabhängige Frequenz in ein analoges Ausgangssignal um.</p>	4.3303.22.xxx .0xx .6xx .x40 .x41 .x60 .x61 .x73	<p>Messbereich</p> <p>Elektr. Ausgang</p> <p>Genauigkeit</p> <p>Betriebsspannung Elektronik Heizung Elektr. Anschluss</p>	<p>0,3 ... 50 m/s 0,3 ... 60 m/s 0 ... 20 mA 4 ... 20 mA 0 ... 1 V 0 ... 10 V 0 ... 5 V $\pm 0,4 \text{ m/s} / \pm 2,5\% \text{ v. Mw.}$</p> <p>14...18 V DC 24 V AC/DC ; 20 W 5-polige Steckverbindung</p>	
<p>Windgeber Dieser Windgeber ist mit einem DC-Generator ausgerüstet, der bei Drehung des Schalensterns eine Gleichspannung erzeugt. Er kann direkt (ohne Stromversorgung) ein entsprechendes Anzeigergerät betreiben.</p>	4.3105.22.000	<p>Messbereich Elektr. Ausgang</p> <p>Belastung Genauigkeit Heizung Elektr. Anschluss</p>	<p>0,5 ... 35 m/s 0 ... 4,67 mA DC, linear, Ra = 400 W max. 60 m/s $\pm 0,5 \text{ m/s} / \pm 2\% \text{ v. Mw.}$ 24 V AC/DC ; 20 W 5-polige Steckverbindung</p>	

Wind Speed and Direction Sensors

Models 05103 Wind Monitor, 05106 Wind Monitor-MA,
05305 Wind Monitor-AQ

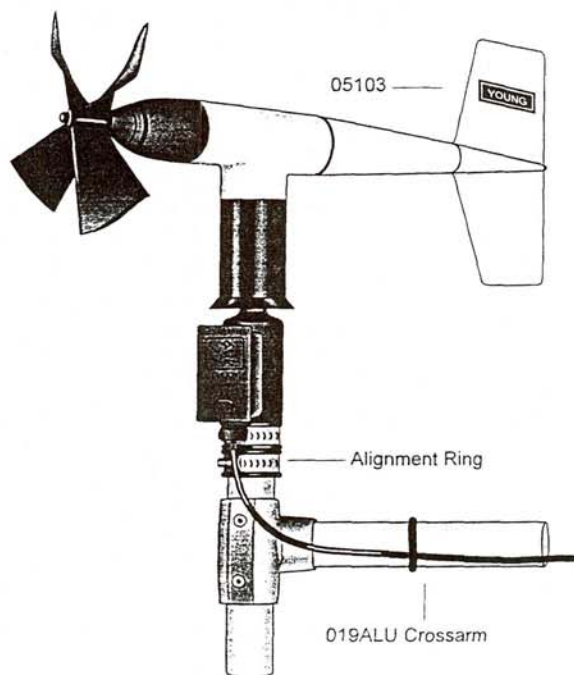
The Wind Monitors are light-weight instruments that measure wind speed and direction. Manufactured by RM Young, the Wind Monitors are cabled for use with our CR510, CR10(X), 21X, CR23X, CR7, CR5000, and CR9000(C) dataloggers. The Wind Monitors' design emphasizes simplicity and lightweight construction. They are made out of rigid UV-stabilized thermoplastic with stainless steel and anodized aluminum fittings. The thermoplastic material resists corrosion from sea air environments and atmospheric pollutants. The Wind Monitors use stainless steel precision-grade ball bearings for the propeller shaft and vertical shaft bearings.

Wind Speed

The wind speed sensor for all the Wind Monitors is a helicoid-shaped, four-blade propeller. Rotation of the propeller produces an ac sine wave that has a frequency directly proportional to wind speed. The ac signal is induced in a transducer coil by a six-pole magnet mounted on the propeller shaft. The coil resides on the non-rotating central portion of the main mounting assembly, eliminating the need for slip rings and brushes.

Wind Direction

All of the Wind Monitors use a potentiometer to measure wind direction. The datalogger applies a known precision excitation voltage to the potentiometer element. The output signal is an analog voltage directly proportional to the azimuth angle.



CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.

815 W. 1800 N. • Logan, Utah 84321-1784 • (435) 753-2342 • FAX (435) 750-9540 • www.campbellsci.com

05103 Wind Monitor

The 05103 Wind Monitor is a sturdy instrument for measuring wind speed and direction in harsh environments. Its simplicity and corrosion-resistant construction make it ideal for a wide range of wind measuring applications.

05106 Wind Monitor-MA

The 05106 Wind Monitor-MA is a robust instrument designed for offshore and marine applications. It features waterproof bearing lubricant and a sealed, heavy-duty cable pigtail instead of the standard junction box.

05305 Wind Monitor-AQ

The 05305 Wind Monitor-AQ is a high performance wind speed and direction sensor designed specifically for air quality measurements. It provides a lower starting threshold, faster response, and higher accuracy than the other wind monitors. However, to achieve the superior performance, the 05305 is less ruggedly constructed. The Wind Monitor-AQ meets or exceeds the requirements published by the following regulatory agencies:

- U.S. Environmental Protection Agency - Ambient Monitoring Guidelines for Prevention of Significant Deterioration (PSD) and On-Site Meteorological Instrumentation Requirements to Characterize Diffusion from Point Sources
- U.S. Nuclear Regulatory Agency - NRC Regulatory Guide 1.23 Meteorological Programs in Support of Nuclear Power Plants
- American Nuclear Society - Standard for Determining Meteorological Information at Nuclear Power Plants

Mounting

The Wind Monitors mount directly on a 1.0 inch IPS Schedule 40 (1.32 in O.D.) pipe. Campbell Scientific supplies a 12-inch pipe for mounting the Wind Monitor to the 019ALU Crossarm. An alignment ring maintains wind direction reference orientation during maintenance.

Ordering Information

Wind Monitor (05103)

- 05103-L_ Specify the lead length, in feet, after the L.
 Order an 8 ft lead length (05103-L8) for CM6/CM10 tripods and UT10 10 ft (3 m) tower
 Order a 21 ft lead length (05103-L21) for UT20 20 ft (7 m) tower
 Order a 31 ft lead length (05103-L31) for a UT30 30 ft (10 m) tower

Wind Monitor-MA (05106)

- 05106-MA_L Specify the lead length, in feet, after the L.
 The lead length recommendations for our tripod and towers are the same as the recommendations for the 05103 Wind Monitor.

Wind Monitor-AQ (05305)

- 05305-L_ Specify lead length, in feet, after the L.
 The lead length recommendations for our tripod and towers are the same as the recommendations for the 05103 Wind Monitor.

Specifications

	<u>05103 and 05106</u>	<u>05305</u>
Wind Speed		
Range:	0-134 mph (0-60 m s ⁻¹)	0-90 mph (0-40 m s ⁻¹)
Accuracy:	±0.6 mph (±0.3 m s ⁻¹)	±0.4 mph (±0.2 m s ⁻¹)
Starting threshold:	2.2 mph (1.0 m s ⁻¹) 05103; 2.4 mph (1.1 m s ⁻¹) 05106	0.9 mph (0.4 m s ⁻¹)
Gust survival:	220 mph (100 m s ⁻¹)	100 mph (45 m s ⁻¹)
Distance constant (63% recovery):	8.9 ft (2.7 m)	6.9 ft (2.1 m)
Output:	ac voltage (3 pulses per revolution). 1800 rpm (90 Hz) = 19.7 mph (8.8 m s ⁻¹)	ac voltage (3 pulses per revolution) 1800 rpm (90 Hz) = 20.6 mph (9.2 m s ⁻¹)
Wind Direction		
Range:	0-360° mechanical, 355° electrical (5° open)	Same
Accuracy:	±3°	±3°
Starting threshold at 10° displacement:	2.2 mph (1.1 m s ⁻¹)	1.0 mph (0.5 m s ⁻¹)
Delay distance (50% recovery):	4.3 ft (1.3 m)	3.9 ft (1.2 m)
Damping ratio:	0.25	0.45
Damped natural wavelength:	24.3 ft (7.4 m)	16.1 ft (4.9 m)
Undamped natural wavelength:	23.6 ft (7.2 m)	14.4 ft (4.4 m)
Output:	Analog dc voltage from potentiometer - resistance 10 KΩ, linearity 0.25%, life expectancy 50 million revolutions.	Same
Power	Switched excitation voltage supplied by the datalogger.	Same

Specifications (continued)

	<u>05103 and 05106</u>	<u>05305</u>
Operating Temperature	-50° to +50°C, assuming non-riming conditions	-50° to +50°C, assuming non-riming conditions
Dimensions		
Overall:	14.6" H x 21.7" L (37 cm x 55 cm)	15.0" H x 25.6" L (38 cm x 65 cm)
Main housing Diameter:	2.0" (5 cm)	Same
Propeller Diameter:	7.1" (18 cm)	7.9" (20 cm)
Mounting Pipe:	1.34" (34 mm) OD; standard 1.0" IPS schedule 40	Same
Weight (shipping approx.)	3.2 lbs (5.5 lbs); 1.5 kg (2.3 kg)	2.5 lbs (5.5 lbs); 1.1 kg (2.3 kg)

Manufactured by RM Young (Traverse City, MI) and cabled by Campbell Scientific for use with our dataloggers.


CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.

2815 W. 1800 N. • Logan, Utah 84321-1784 • (435) 753-2342 • FAX (435) 750-9540
 Offices also located in: Australia • Brazil • Canada • England • France • South Africa • Spain

Copyright © 1997-2003
 Campbell Scientific, Inc.
 Printed August 2003

Chapter 1 Specifications
DC, Resistance, and Temperature Accuracy Specifications

■ DC, Resistance, and Temperature Accuracy Specifications

± (% of reading + % of range)^[1]
Includes measurement error, switching error, and transducer conversion error

Function	Range ^[3]	Test Current or Burden Voltage	24 Hour ^[2] 23 °C ± 1 °C	90 Day 23 °C ± 5 °C	1 Year 23 °C ± 5 °C	Temperature Coefficient /°C 0 °C – 18 °C 28 °C – 55 °C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0035	0.0040 + 0.0040	0.0050 + 0.0040	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	300.000 V		0.0020 + 0.0020	0.0035 + 0.0030	0.0045 + 0.0030	0.0005 + 0.0003
Resistance ^[4]	100.0000 Ω	1 mA current source	0.0030 + 0.0035	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 kΩ	1 mA	0.0020 + 0.0006	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	10.000000 kΩ	100 μA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	100.0000 kΩ	10 μA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	1.000000 MΩ	5 μA	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0010 + 0.0002
	10.00000 MΩ	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.0030 + 0.0004
	100.0000 MΩ	500 nA 10 MΩ	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002
DC Current 34901A Only	10.000000 mA	< 0.1 V burden	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.002 + 0.0020
	100.0000 mA	< 0.6 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.002 + 0.0005
	1.000000 A	< 2 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.005 + 0.0010
Temperature	Type	Best Range Accuracy ^[5]		Extended Range Accuracy ^[5]		
Thermocouple ^[6]	B	1100°C to 1820°C	1.2°C	400°C to 1100°C	1.8°C	0.03°C
	E	-150°C to 1000°C	1.0°C	-200°C to -150°C	1.5°C	0.03°C
	J	-150°C to 1200°C	1.0°C	-210°C to -150°C	1.2°C	0.03°C
	K	-100°C to 1200°C	1.0°C	-200°C to -100°C	1.5°C	0.03°C
	N	-100°C to 1300°C	1.0°C	-200°C to -100°C	1.5°C	0.03°C
	R	300°C to 1760°C	1.2°C	-50°C to 300°C	1.8°C	0.03°C
	S	400°C to 1760°C	1.2°C	-50°C to 400°C	1.8°C	0.03°C
T	-100°C to 400°C	1.0°C	-200°C to -100°C	1.5°C	0.03°C	
RTD	R ₀ from 49Ω to 2.1 kΩ	-200°C to 600°C	0.06°C			0.003°C
Thermistor	2.2 k, 5 k, 10 k	-80°C to 150°C	0.08°C			0.002°C

[1] Specifications are for 1 hour warm up and 6½ digits

[2] Relative to calibration standards

[3] 20% over range on all ranges except 300 Vdc and 1 Adc ranges

[4] Specifications are for 4-wire ohms function or 2-wire ohms using Scaling to remove the offset.

Without Scaling, add 4Ω additional error in 2-wire ohms function.

[5] 1 year accuracy. For total measurement accuracy, add temperature probe error.

[6] Thermocouple specifications not guaranteed when 34907A module is present

Chapter 1 Specifications
DC Measurement and Operating Characteristics



DC Measurement and Operating Characteristics

DC Measurement Characteristics [1]		DC Operating Characteristics [5]			
DC Voltage		Function	Digits [6]	Readings/s	Additional Noise Error
Measurement Method:	Continuously Integrating, Multi-slope III A/D Converter	DCV, DCI, and Resistance:	6½	0.6 (0.5)	0% of range
A/D Linearity:	0.0002% of reading + 0.0001% of range		6½	6 (5)	0% of range
Input Resistance:			5½	60 (50)	0.001% of range [7]
100 mV, 1 V, 10 V ranges	Selectable 10 MΩ or >10 GΩ		5½	300	0.001% of range [7]
100 V, 300 V ranges	10 MΩ ±1%		4½	600	0.01% of range [7]
Input Bias Current:	< 30 pA at 25 °C	Single Channel Measurement Rates [6]			
Input Protection:	300 V on all ranges	Function	Resolution	Readings/s	
Resistance		DCV, 2-Wire Ohms:	6½ (10 PLC)	6 (5)	
Measurement Method:	Selectable 4-wire or 2-wire Ohms, Current source reference to LO input		5½ (1 PLC)	57 (47)	
Offset Compensation:	Selectable on 100Ω, 1 kΩ, 10 kΩ ranges		4½ (0.02 PLC)	600	
Max. Lead Resistance:	10% of range per lead for 100Ω and 1 kΩ ranges, 1 kΩ on all other ranges	Thermocouple:	0.1 °C (1 PLC)	57 (47)	
Input Protection:	300 V on all ranges		(0.02 PLC)	220	
DC Current		RTD, Thermistor:	0.01 °C (10 PLC)	6 (5)	
Shunt Resistance:	5Ω for 10 mA, 100 mA; 0.1Ω for 1A.		0.1 °C (1 PLC)	57 (47)	
Input Protection:	1.5A 250 V fuse on 34901A module		1 °C (0.02 PLC)	220	
Thermocouple		Autozero OFF Operation			
Conversion:	ITS-90 software compensation	Following instrument warm-up at calibration temperature ±1 °C and < 10 minutes, add 0.0002% range additional error + 5 μV.			
Reference Junction Type:	Internal, Fixed, or External	Settling Considerations			
Open T/C Check:	Selectable per channel. Open > 5 kΩ	Reading settling times are affected by source impedance, low dielectric absorption characteristics, and input signal changes.			
RTD					
	α = 0.00385 (DIN) and 0.00391				
Thermistor					
	44004, 44007, 44006 series				
Measurement Noise Rejection 60 Hz (50 Hz) [2]					
DC CMRR:	140 dB				
Integration Time		Normal Mode Rejection [3]			
200 PLC / 3.33s (4s)		110 dB [4]			
100 PLC / 1.67s (2s)		105 dB [4]			
20 PLC / 333 ms (400 ms)		100 dB [4]			
10 PLC / 167 ms (200 ms)		95 dB [4]			
2 PLC / 33.3 ms (40 ms)		90 dB			
1 PLC / 16.7 ms (20 ms)		60 dB			
< 1 PLC		0 dB			

[1] 300 Vdc isolation voltage (ch-ch, ch-earth)

[2] For 1 kΩ unbalance in LO lead

[3] For power line frequency ±0.1%

[4] For power line frequency ±1%, use 80 dB.

For power line frequency ±3%, use 60 dB.

[5] Reading speeds for 60 Hz and (50 Hz) operation; autozero OFF

[6] 6½ digits=22 bits, 5½ digits=18 bits, 4½ digits=15 bits

[7] Add 20 μV for DCV, 4 μA for DCI, or 20 mΩ for resistance

[8] For fixed function and range, readings to memory,

scaling and alarms off, autozero OFF

Chapter 1 Specifications
AC Accuracy Specifications

■ AC Accuracy Specifications

\pm (% of reading + % of range)^[1]
Includes measurement error, switching error, and transducer conversion error

Function	Range ^[3]	Frequency	24 Hour ^[2] 23 °C ± 1 °C	90 Day 23 °C ± 5 °C	1 Year 23 °C ± 5 °C	Temperature Coefficient /°C 0 °C – 18 °C 28 °C – 55 °C	
True RMS AC Voltage ^[4]	100.0000 mV to 100 V	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.03	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.004	
		5 Hz – 10 Hz	0.35 + 0.03	0.35 + 0.04	0.35 + 0.04	0.035 + 0.004	
		10 Hz – 20 kHz	0.04 + 0.03	0.05 + 0.04	0.06 + 0.04	0.005 + 0.004	
		20 kHz – 50 kHz	0.10 + 0.05	0.11 + 0.05	0.12 + 0.05	0.011 + 0.005	
		50 kHz – 100 kHz	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008	
		100 kHz – 300 kHz ^[5]	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02	
	300.0000 V	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.05	1.00 + 0.08	1.00 + 0.08	0.100 + 0.008	
		5 Hz – 10 Hz	0.35 + 0.05	0.35 + 0.08	0.35 + 0.08	0.035 + 0.008	
		10 Hz – 20 kHz	0.04 + 0.05	0.05 + 0.08	0.06 + 0.08	0.005 + 0.008	
		20 kHz – 50 kHz	0.10 + 0.10	0.11 + 0.12	0.12 + 0.12	0.011 + 0.012	
		50 kHz – 100 kHz	0.55 + 0.20	0.60 + 0.20	0.60 + 0.20	0.060 + 0.020	
		100 kHz – 300 kHz ^[5]	4.00 + 1.25	4.00 + 1.25	4.00 + 1.25	0.20 + 0.05	
Frequency and Period ^[6]	100 mV to 300 V	3 Hz – 5 Hz	0.10	0.10	0.10	0.005	
		5 Hz – 10 Hz	0.05	0.05	0.05	0.005	
		10 Hz – 40 Hz	0.03	0.03	0.03	0.001	
		40 Hz – 300 kHz	0.006	0.01	0.01	0.001	
True RMS AC Current <i>31901A Only</i>	10.00000 mA ^[4] and 1.000000 A ^[4]	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.006	
		5 Hz – 10 Hz	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.035 + 0.006	
		10 Hz – 5 kHz	0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.015 + 0.006	
	100.0000 mA ^[7]	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.5	1.00 + 0.5	1.00 + 0.5	0.100 + 0.06	
		5 Hz – 10 Hz	0.30 + 0.5	0.30 + 0.5	0.30 + 0.5	0.035 + 0.06	
		10 Hz – 5 kHz	0.10 + 0.5	0.10 + 0.5	0.10 + 0.5	0.015 + 0.06	
Additional Low Frequency Error for ACV, ACI (% of reading)			Additional Error for Frequency, Period (% of reading)				
Frequency	AC Filter Slow	AC Filter Medium	AC Filter Fast	Frequency	6½ Digits	5½ Digits	4½ Digits
10 Hz - 20 Hz	0	0.74	—	3 Hz - 5 Hz	0	0.12	0.12
20 Hz - 40 Hz	0	0.22	—	5 Hz - 10 Hz	0	0.17	0.17
40 Hz - 100 Hz	0	0.06	0.73	10 Hz - 40 Hz	0	0.2	0.2
100 Hz - 200 Hz	0	0.01	0.22	40 Hz - 100 Hz	0	0.06	0.21
200 Hz - 1 kHz	0	0	0.18	100 Hz - 300 Hz	0	0.03	0.21
> 1 kHz	0	0	0	300 Hz - 1 kHz	0	0.01	0.07
				> 1 kHz	0	0	0.02

[1] Specifications are for 1 hour warm up and 6½ digits, Slow ac filter

[2] Relative to calibration standards

[3] 20% over range on all ranges except 300 Vac and 1 Aac ranges

[4] For sinewave input > 5% of range. For inputs from 1% to 5% of range and < 50 kHz, add 0.1% of range additional error.

[5] Typically 30% of reading error at 1 MHz, limited to 1×10^6 V Hz

[6] Input > 100 mV. For 10 mV inputs, multiply % of reading error x 10.

[7] Specified only for inputs > 10 mA

CERTIFICATE OF CONFORMANCE AND CALIBRATION VALIDITY

This certifies that the product detailed below was tested using procedures that comply with Fluke's ISO9001 registration, and conforms to all relevant specifications.

Test and calibration equipment used by Fluke Precision Measurement is maintained with a calibration program conforming to ISO10012-1 and MIL-STD-45662A and is traceable to National and International Standards, or consensus standards (where no National Standard exists), or verified using approved ratio techniques. Related calibration equipment records are on file at Fluke and may be examined upon request.

Model 9100

Serial Number 854427851

Options

Calibration Date 28 JANUARY 2004

Issue Date 28 JANUARY 2004

Signed *[Signature]*

Name S. FARR

FLUKE®

Fluke Precision Measurement Ltd, Hurricane Way, Norwich, NR6 6JB, United Kingdom.
Tel: +44 (0) 1603 286600 Fax: +44 (0) 1603 483670



FM 29700
ISO9001



CERTIFICATE OF CALIBRATION

Date of Issue : 28-Jan-2004

Certificate Number : F03886

Page 1 of 10

Checked By : 

Printed Name : R. A. Bull.

Date of Measurement : 28-Jan-2004
 Instrument Manufacturer : Wavetek/Datron
 Instrument Type : 9100 Multifunction Calibrator
 Instrument Serial Number : 47851 (Adaptor Ser.No. 43583)

Results Type : After Adjustment

The measurements were made using an automated calibration system. The relevant data concerning environmental conditions, function, range and uncertainty for each point are contained in the following pages.

This Product was calibrated using procedures that comply with the company's ISO9002 registration, number FM 29700. The calibration standards used are maintained in accordance with ISO/IEC 17025 and are traceable to National and International standards, to Consensus standards (where no National Standard exists), or are derived by ratio techniques.

Fluke Precision Measurement Ltd.

50 Humberstone Way, Norwich, Norfolk NR6 6JE, United Kingdom. Tel: +44 (0)1603 721000 Fax: +44 (0)1603 450070 Web: www.fluke.com/UK
 Registered in England No. 1411123



CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificate Number : F03886

Page 2 of 10

Environment Details

Date : 28-Jan-2004
 Time : 15:09:22
 Temperature : 23°C ±1°C
 Humidity : 40% ±10%

Calibrator details (UUT)

Calibrator Type : 9100
 Code Number : 854447851
 Serial Number : 854447851
 Manufacturer/model number : Wavetek/Datron 9100

4950MTS details (standard)

Serial Number : 23509
 Shunt Serial Number : 23782

Calibration Unit detail (standard)

Serial Number : 40499

1271 Sampling DVM detail (standard)

Serial Number : 39020

901 Frequency Meter detail (standard)

Serial Number : 732602

PRT CJ Probe detail (standard)

Serial Number : C1/515B

Software details (standard)

System Software Issue : 4.01

Main Function Procedure Issue : 1.00

Measurement Type : Adjustment and verification

Specification Period : 1 year

Fluke Precision Measurement Ltd.

12 Hurricane Way, Norwich, Norfolk, NR6 6JF, United Kingdom. Tel: +44 (0)1603 256600 Fax: +44 (0)1603 403670 Web: www.fluke.com/ftp
 Registered in England No. 1410123



CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificate Number : F03886

Page 3 of 10

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%. The reported uncertainties are based on methods consistent with the ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement and are inclusive of the UUT. The uncertainties relate only to the Measured Values and do not carry any implication regarding the long term stability of the instrument.

All uncertainties are in ppm of the measured value unless otherwise stated..

Test points marked with a question mark "?" do not comply with the instrument specification.

Fluke Precision Measurement Ltd.

50 Hurricane Way, Norwich, Norfolk, NR6 6JL, United Kingdom. Tel: +44 (0)1603 450500. Fax: +44 (0)1603 483670. Web: www.fluke.com/ftp
Registered in England No. 1410123



CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificate Number : F03886

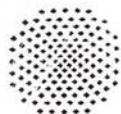
Page 4 of 10

Function Test Point	Nominal Value	Measured Value	Difference	Uncertainty
DC Voltage				
Offset	0.000000 V	0.000000 V	0.000000 V	±1.6 μ V
+300mV	0.300000 V	0.299998 V	-6.7 ppm	±8.9
-300mV	-0.300000 V	-0.300001 V	3.3 ppm	±8.9
+3V	3.000000 V	3.000000 V	0.0 ppm	±8.5
-3V	-3.000000 V	-3.000002 V	6.7 ppm	±8.5
+450mV	0.450000 V	0.450000 V	0.0 ppm	±38.4
-450mV	-0.450000 V	-0.450002 V	44.4 ppm	±38.4
+1.5V	1.500000 V	1.500001 V	6.7 ppm	±13.8
-1.5V	-1.500000 V	-1.500002 V	13.3 ppm	±13.8
+30V	30.000000 V	30.00001 V	3.3 ppm	±10.2
-30V	-30.000000 V	-30.00001 V	3.3 ppm	±10.2
+4.5V	4.500000 V	4.50002 V	44.4 ppm	±40.0
-4.5V	-4.500000 V	-4.50000 V	0.0 ppm	±40.0
+300V	300.000000 V	300.00000 V	0.0 ppm	±10.2
-300V	-300.000000 V	-299.99999 V	-3.3 ppm	±10.2
+45V	45.000000 V	45.00001 V	22.2 ppm	±40.0
-45V	-45.000000 V	-45.00001 V	22.2 ppm	±40.0
+1kV	1000.000000 V	1000.00000 V	0.0 ppm	±5.4
-1kV	-1000.000000 V	-999.99999 V	-1.0 ppm	±5.4
+330V	330.000000 V	330.00009 V	27.3 ppm	±9.7
-330V	-330.000000 V	-330.00100 V	30.3 ppm	±9.7
AC Voltage				
1kHz	0.300000 V	0.299999 V	-33.3 ppm	±95
30kHz	0.300000 V	0.300000 V	0.0 ppm	±95
100kHz	0.300000 V	0.300004 V	133.3 ppm	±138
10Hz	0.300000 V	0.300001 V	33.3 ppm	±107
40Hz	0.300000 V	0.300001 V	33.3 ppm	±95
3kHz	0.300000 V	0.299998 V	-66.7 ppm	±95
10kHz	0.300000 V	0.299999 V	-33.3 ppm	±95
50kHz	0.300000 V	0.299994 V	-200.0 ppm	±130
1kHz	3.000000 V	3.000000 V	0.0 ppm	±95
30kHz	3.000000 V	2.99999 V	-33.3 ppm	±97
100kHz	3.000000 V	2.99998 V	-66.7 ppm	±132
1kHz	1.500000 V	1.500000 V	0.0 ppm	±164
10Hz	3.000000 V	3.00003 V	100.0 ppm	±107
40Hz	3.000000 V	3.00002 V	66.7 ppm	±95
3kHz	3.000000 V	2.99999 V	-33.3 ppm	±95
10kHz	3.000000 V	2.99999 V	-33.3 ppm	±95
50kHz	3.000000 V	3.000000 V	0.0 ppm	±126
1kHz	30.000000 V	30.00000 V	0.0 ppm	±115
30kHz	30.000000 V	29.99999 V	-33.3 ppm	±117
100kHz	30.000000 V	30.00004 V	133.3 ppm	±193
10Hz	30.000000 V	30.0002 V	66.7 ppm	±129
40Hz	30.000000 V	30.0001 V	33.3 ppm	±124

Fluke Precision Measurement Ltd.

22 Mulcane Way, Norwich, Norfolk, NR6 6JL, United Kingdom. Tel: +44 (0)1603 296980 Fax: +44 (0)1603 483670 Web: www.fluke.com/uk/10
 Registered in England (No. 1410125)

**ANEXO2: CERTIFICADO DE UM ENSAIO DO TIPO
QUASI DINÂMICO**



FORSCHUNGS- UND TESTZENTRUM
FÜR SOLARANLAGEN
STUTT GART

itw

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Universität Stuttgart

Professor Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen

Test Report Thermal Performance of Solar Collector

acc. to EN 12975-2: 2001

Test Report No.: 02COL273

Stuttgart, Sep. 6th, 2002

Client:	Federal University of Florianopolis Department of Mechanical Engineering Solar Energy Laboratory CEP 88 040 - 900 Florianópolis Brazil
Manufacturer:	SOLARES
Brand name:	CSP – 140 V
Year of production:	2002

TZS • Pfaffenwaldring 6 • D-70550 Stuttgart • Tel. (0711) 685-3536 • Fax (0711) 685-3503

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 2 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	<input type="text" value="SOLARES"/>	Serial no.:	<input type="text" value="."/>
Brand name:	<input type="text" value="CSP - 140 V"/>	Year of production:	<input type="text" value="2002"/>

Contents

1 General Specifications	3
2 Thermal Performance Test Results	5
3 Test Occurences and Operating Behaviour	6
4 Test Methods	6
Annex A: Prediction of the yearly energy gain	7
Annex B: Explanation upon the measurements under quasi-dynamic conditions.	8
Annex C: Symbols and Units	11

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 3 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	-
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

1 General Specifications (acc. to manufacturer)

Manufacturer	SOLARES Rua Juvenal Francisco Perera 340 Kobrasol Sao José Santa Catarina CEP 88.102.140 Brazil
brand name:	CSP - 140 V
serial no. :	-
serial product or prototype:	prototype
year of production:	2002

Dimensions of collector unit	determined by test laboratory
gross area:	1.43 m ²
aperture area:	1.36 m ²
absorber area:	1.32 m ²

Technical Figures	collector type:	flat plate collector
	length:	1415 mm (determined by test lab.)
	width:	1014 mm (determined by test lab.)
	height:	64 mm (determined by test lab.)
	materials:	aluminium
	weight:	not specified
	insulation material:	mineral wool
	collector mounting:	roof or ground mounting

Absorber	material:	copper
	thickness:	0.2 mm
	surface treatment:	painted surface
	absorptance:	0.95
	emittance:	0.86
	heat transfer fluid content:	not specified
	flow pattern:	parallel
	dimensions absorber tubes:	15 mm x 0.4 mm
	number of absorber tubes:	8
	distance between absorber tubes:	125 mm
	dimensions of the header:	28 mm x 0.4 mm

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 4 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	-
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

Transparent Cover

number:	1
material:	glass
manufacturer:	Santa Marina
brand name:	not specified
transmittance:	0.82
thickness:	4 mm

Thermal Insulation

material:	mineral wool	Isover-Santa Marina
thermal conductivity:	not specified	not specified
heat capacity:	not specified	not specified
density:	20 kg/m ³	not specified
thickness:	50 mm	5 mm

Limitations

stagnation temperature (°C):	160°C
max. admissible operation pressure:	4 bar
allowed heat transfer medium:	water
nominal flowrate per collector:	not specified

Ascertainment of collector

construction characteristics:	No construction details are available.
technical data sheets:	Information about construction materials is not available.
collector label:	A collector label is completely missing. It should contain the following data: name of the manufacturer brand name serial number year of production gross absorber area max. operation pressure stagnation temperature at 1000 W/m ² and 30 °C volume of heat transfer medium collector weight in empty state produced in:
mounting mode:	No installation instructions available.

TZS Stuttgart
Pfaifenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 5 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

2 Thermal Performance Test Results

Determination of efficiency:
$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G^*} - a_2 \cdot \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G^*}$$

(based on aperture area)

η_0	0.699
a_1 [W / (m ² K)]	5.985
a_2 [W / (m ² K ²)]	0.036
incidence angle modifier $K_{\theta}(\theta)$ [-]	see table in Annex A
effective heat capacity C [J/K]	17202
volume flowrate [l/(m ² h)]	60
used heat carrier	water

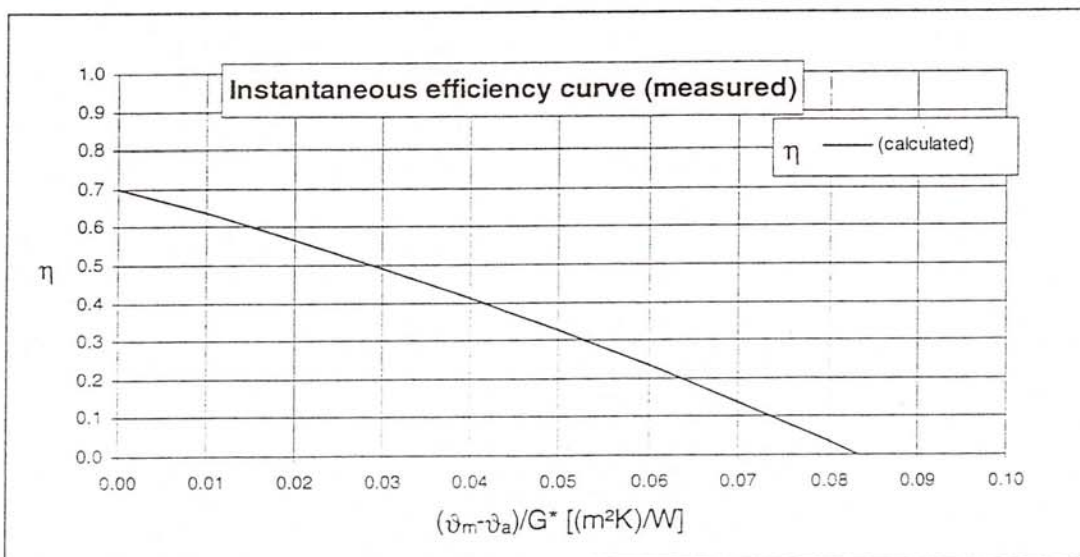


Table of efficiency ($G^* = 800 \text{ W/m}^2$)

$(\vartheta_m - \vartheta_a)/G^*$ [(m ² K)/W]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
η	0.699	0.636	0.568	0.493	0.413	0.327	0.235	0.137	0.034	0	0

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 5 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	-
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

3 Test Occurrences and Operating Behaviour

Nothing particular.

4 Test Methods

The outdoor test of the collector was carried out under quasi dynamic conditions according to EN 12975-2:2001 "Thermal solar systems and components – Solar Collectors – Part 2: Test methods". Water was used as heat carrier.

At present, it is not possible to make any claims from the test results regarding standards, admission or quality.

receipt of test sample: July 18th 2002
test period: July 22th to Aug. 20th 2002
test engineer: Dipl.-Phys. M. Hampel

Stuttgart, Sep. 6th 2002



Prof. Dr.-Ing. H. Müller-Steinhagen

TZS Stuttgart
Pfaifenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 7 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

Annex A: Prediction of the yearly energy gain

The prediction is based on the calculation of the yearly energy gains of the collector in a reference solar hot water system. This system is designed for a four-person-household. The calculation is done for aperture areas of 3, 4, 5 and 6 m² and for reference climate data of Hannover, Würzburg und Stötten (Ostalb).

collector parameters (based on aperture area)										
zero-loss efficiency	heat transfer coefficient		area based effective thermal capacity							
$\eta_0 = 0.699$	$a_1 = 5.985 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ $a_2 = 0.036 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$		$c = 12.686 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$							
incidence angle modifier										
$K_{\text{ed}} = 0.88$	Θ	0	10	20	30	40	50	60	70	90
	$K_{\text{ab}}(\Theta) =$	1.000	0.997	0.990	0.975	0.950	0.909	0.837	0.686	0.000

system data of the ITW reference solar hot water system	
roof orientation:	south; tilt angle equal to latitude
collector piping:	15 m each to store, from store; nominal value DN 16; insulation thickness 25 mm, $\lambda = 0.04 \text{ W}/(\text{mK})$, one half of each pipe is located outside, the other half is located inside
storage:	volume 300 l heat loss rate 2,2 W/K; ambient temperature 15°C volume auxiliary 135 l; set temperature 60 °C stratification number 100: effektive vertical heat conductivity $2 \lambda_{\text{water}}$
heat:	immersed heat exchanger, $(kA)_{\text{WT}} = 9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; aperture area $\cdot \dot{v}_m^{0,6}$; (\dot{v}_m = average value of heat exchanger inlet temperature and local storage temperature in °C)
warm water consumption:	200 l/day (7 ⁰⁰ : 80 l; 12 ⁰⁰ : 40 l; 19 ⁰⁰ : 80 l); cold water temperature 10 °C; hot water temperature 45 °C; annual consumption: 2936 kWh/a

calculation results:			
location	Hannover	Würzburg	Stötten
radiation [kWh/(m ² a)]	1022	1212	1354
aperture area [m ²]	yearly energy gain ¹⁾ [kWh/(m ² a)]		
3	341	412	438
4	301	363	387
5	270	325	346
6	244	294	312

¹⁾ energy gain of the collector without heat losses in the tubes and hot water store

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 3 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	.
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

Annex B:

Explanation upon the measurements under quasi-dynamic conditions

The collector parameters shown on page 5 are, according to EN 12975-2:2001, derived from the collector parameters gained from measurements under quasi-dynamic conditions

Used collector model

For evaluation of the measured data the area specific collector power was modelled according to the equation

$$\dot{q} = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\Theta b}(\theta) G_b + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\Theta d} G_d - c_1(\vartheta_m - \vartheta_a) - c_2(\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - c_5 \frac{d\vartheta_m}{dt}$$

with

$$K_{\Theta b} = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$$

Regression results

based on the aperture area	
$F'(\tau\alpha)_{en}$:	0.715 [-]
b_0 :	0.163 [-]
$K_{\Theta d}$:	0.882 [-]
c_1 :	5.985 [W/(m ² K)]
c_2 :	0.036 [W/(m ² K ²)]
c_5 :	12.686 [kJ/(m ² K)]

Table of the incidence angle modifier of the direct solar irradiance

incident angle θ	0	10	15	20	30	40	50	60	70	90
$K_{\Theta b}(\theta)$:	1.000	0.997	0.994	0.990	0.975	0.950	0.909	0.837	0.686	0.000

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 5
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 535-3536
Telefax +49 (0)711 535-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 9 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

Calculation of the collector parameters shown on page 5

η_0 :	zero-loss collector efficiency (η_0 at $\vartheta_m - \vartheta_a = 0$) [-] $\eta_0 = F'(\tau\alpha)_{en} \cdot K_{\theta_0}(\theta = 15^\circ) \cdot 0.85 + F'(\tau\alpha)_{en} \cdot K_{\theta_{dl}} \cdot 0.15$
a_1 :	heat loss coefficient [W/(m ² K)] $a_1 = c_1$
a_2 :	temperature dependence of the heat loss coefficient [W/(m ² K ²)] $a_2 = c_2$
$K_{\theta}(50)$:	incident angle modifier for hemispherical solar irradiance [-] $K_{\theta}(50) = \frac{K_{\theta}(50) \cdot 0.85 + K_{\theta_{dl}} \cdot 0.15}{1 - 0.15 + K_{\theta_{dl}} \cdot 0.15}$
C :	effective thermal capacity of the collector [J/K] $C = c_5 \cdot \text{aperture area} \cdot 1000$

Graphical presentation of the measured data (5 minutes mean values)

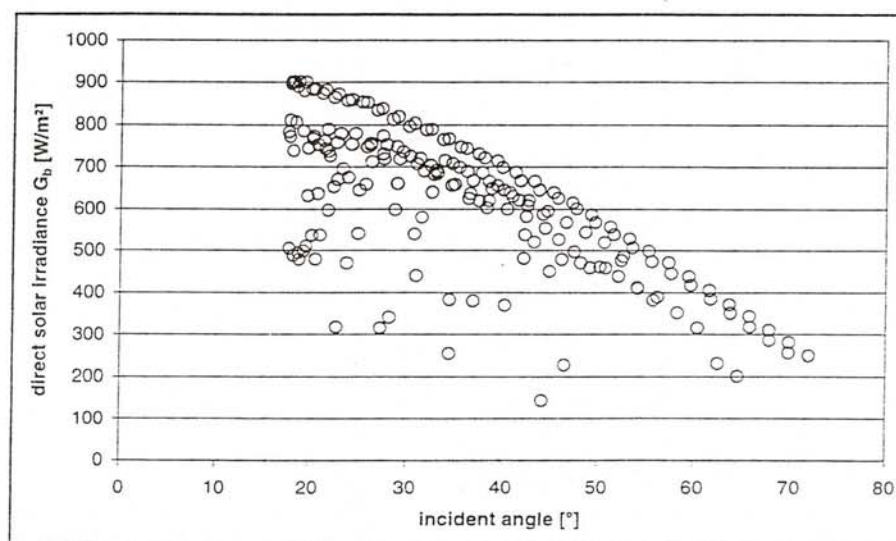


Figure B.1: the direct solar irradiance over the incident angle of the direct solar irradiance

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 10 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

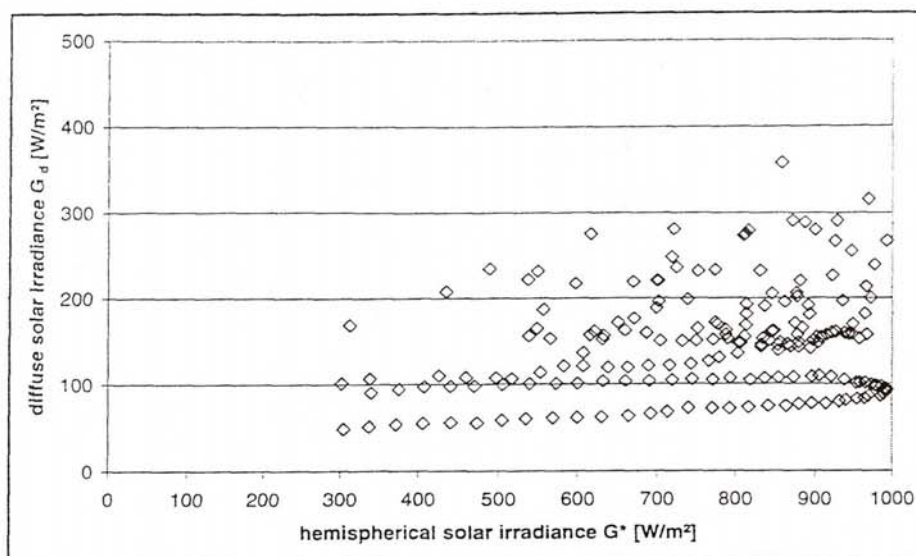


Figure B.2: diffuse solar irradiance over the total solar irradiance

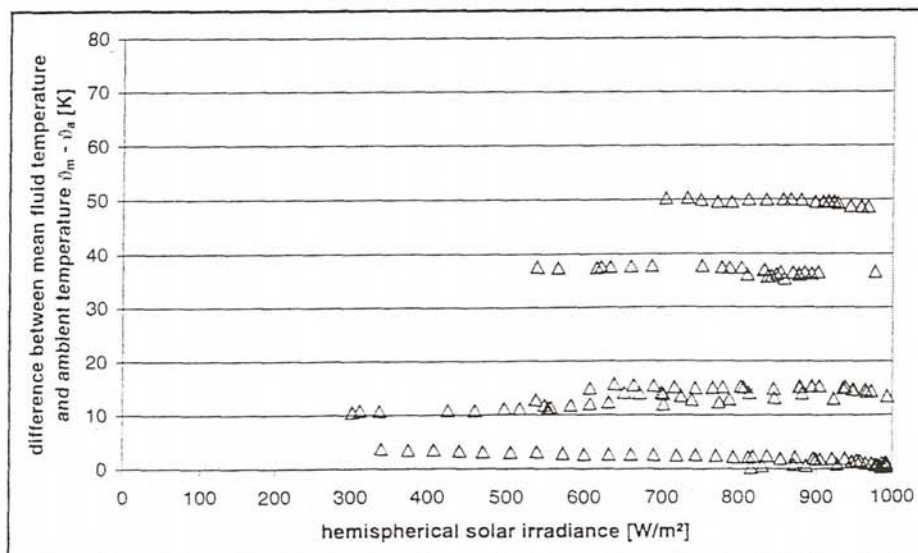


Figure B.3: difference between mean fluid temperature and ambient temperature over the hemispherical solar irradiance

TZS Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
D-70550 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-3536
Telefax +49 (0)711 685-3503
email tzs@itw.uni-stuttgart.de

page 11 out of 11

Test report no.: 02COL273

Manufacturer:	SOLARES	Serial no.:	
Brand name:	CSP - 140 V	Year of production:	2002

Annex C: Symbols and Units

a	$[(\text{mbar h}^2)/l^2]$	coefficient for calculation of pressure loss
a_1	$[W/(m^2K)]$	heat transfer coefficient
a_2	$[W/(m^2K^2)]$	temperature depending heat transfer coefficient
b	$[(\text{mbar h})/l]$	coefficient for calculation of pressure loss
b_0	$[-]$	factor to determine the incident angle modifier of the beam irradiance
C	$[J/K]$	effective thermal capacity of the collector
c	$[kJ/(m^2 K)]$	area based effective thermal capacity of the collector
c_1	$[W/(m^2K)]$	heat loss coefficient
c_2	$[W/(m^2K^2)]$	temperature dependence of the heat loss coefficient
c_5	$[kJ/(m^2K)]$	area based effective thermal capacity of the collector
F'	$[-]$	collector efficiency factor
G^*	$[W/m^2]$	hemispherical solar irradiance
G_b	$[W/m^2]$	direct solar irradiance (beam irradiance)
G_d	$[W/m^2]$	diffuse solar irradiance
$K_b(\theta)$	$[-]$	incident angle modifier for hemispherical solar radiation
$K_{db}(\theta)$	$[-]$	incident angle modifier for direct solar radiation
K_{dd}	$[-]$	incident angle modifier for diffuse solar radiation
$(kA)_{WT}$	$[W/K]$	heat transfer capacity of the solar heat exchanger
\dot{q}	$[W/m^2]$	area based useful power extracted from the collector
\dot{V}	$[l/h]$	volume flow rate of heat transfer fluid
Δp	$[mbar]$	pressure loss
η	$[-]$	collector efficiency
η_0	$[-]$	zero-loss collector efficiency (η_0 at $\vartheta_m - \vartheta_a = 0$)
λ	$[W/(mK)]$	heat conductivity
$(\tau\alpha)_{en}$	$[-]$	effective transmittance-absorptance product for direct solar radiation at normal incidence
ϑ	$[^\circ C]$	temperature
ϑ_a	$[^\circ C]$	ambient air temperature
ϑ_e	$[^\circ C]$	collector outlet temperature of heat transfer fluid
ϑ_{in}	$[^\circ C]$	collector inlet temperature of heat transfer fluid
ϑ_m	$[^\circ C]$	mean temperature of heat transfer fluid
θ	$[^\circ]$	incidence angle of the direct solar radiation