

4

Materiais e Métodos Experimentais

4.1.

Introdução

A análise experimental desta pesquisa foi desenvolvida utilizando-se dois dispositivos de medição similares que tiveram suas características de medição avaliadas antes de serem usados para medir a condutividade térmica dos líquidos de interesse. O uso de mais de um equipamento permite confirmar as avaliações e os resultados obtidos, bem como a reprodutibilidade do método. Segundo o VIM (Inmetro, 2012a), a condição de reprodutibilidade de medição é definida como a condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares.

Toda a parte experimental desta tese foi desenvolvida nas dependências do Laboratório de Higrometria (Lahig) do Inmetro, onde foi possível contar com toda a infraestrutura laboratorial da instituição, seus padrões de referência e demais equipamentos. Cabe ressaltar que a instrumentação utilizada nesta pesquisa possui suas características de medição avaliadas, de modo a garantir a confiabilidade metrológica.

4.2.

Meio Térmico

Para a realização desta pesquisa, foi necessário utilizar um meio térmico estável para efetuar a calibração dos dispositivos e a climatização das amostras. Sendo assim, foi utilizado um banho termostático Julabo, modelo FP40-MC, que opera na faixa de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. O equipamento possui controle de temperatura do tipo PID (*Proportional Integral Derivative*), sistema de agitação do fluido de trabalho, cuba com 200 mm de profundidade e estabilidade térmica de $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Julabo, 2007). A Figura 20 mostra o banho termostático utilizado nesta pesquisa.



Figura 20 – Banho termostático

Antes do seu uso, o banho termostático foi avaliado quanto às variações de temperatura no espaço interno e às flutuações de temperatura ao longo do tempo. É de suma importância quantificar tais diferenças, uma vez que elas representam uma considerável fonte de incerteza quando o equipamento é utilizado para manter amostras e instrumentos de medição em uma determinada temperatura. A avaliação térmica foi realizada de 5 °C a 50 °C considerando-se profundidades de imersão distintas (40 mm, 80 mm e 120 mm). Os resultados obtidos, registrados no relatório técnico R-2161/2011 emitido pelo Laboratório de Higrometria (Lahig) do Inmetro em 30/09/11, foram considerados na estimativa das incertezas de medição dos termistores dos sistemas de medição, que por sua vez, foram consideradas na estimativa das incertezas de condutividade térmica e do teor de água.

4.3. Sensores de Esfera Quente

Os sistemas de medição foram produzidos pela empresa eslovaca *Transient Measurement Systems*. Os equipamentos, que fazem automaticamente a aquisição das medições de temperatura, são compostos por uma unidade eletrônica e pelo sensor remoto de esfera quente. O sensor, que possui diâmetro nominal de 2 mm, é constituído de um termistor NTC de 47 k Ω e de uma resistência elétrica de 100 Ω que são fixados por meio de resina epóxi preenchida com partículas de Ni. A faixa de operação do termistor é de -40 °C a 150 °C. Os equipamentos possuem faixa nominal de geração de potência de 1 mW a 30 mW e produzem incrementos

de temperatura de 0,1 °C a 5 °C (Transient Measurement Systems, 2011; Kubicar, 2012). A Figura 21 mostra o diagrama dos dispositivos de medição.

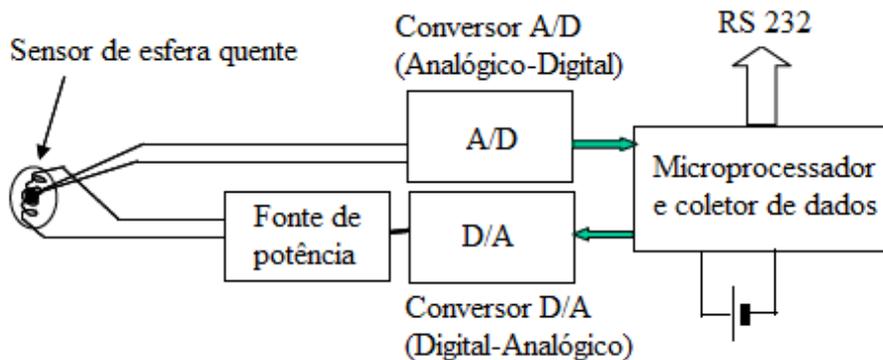


Figura 21 – Diagrama do dispositivo de medição (Kubicar *et al.* 2008)

A taxa de transferência de calor do sensor de esfera quente para o meio é resultante do processo de geração de energia interna, decorrente da conversão de energia elétrica em energia térmica. Esse fenômeno ocorre devido ao aquecimento resistivo, isto é, uma corrente elétrica I passa através de uma resistência R_E no interior do sensor (volume de controle), energia elétrica é então dissipada a uma taxa igual a $I^2 R_E$, que corresponde à taxa na qual a energia térmica é liberada. A Figura 22 mostra um dos dispositivos de medição e os sensores de esfera quente.



Figura 22 – Dispositivo de medição (esquerda) e sensores de esfera quente (direita)

4.3.1. Calibração dos Termistores

A calibração prévia dos termistores dos sensores de esfera quente foi realizada no Lahig por meio da comparação de suas medições com aquelas indicadas por um padrão de referência.

4.3.1.1. Padrão de Referência

Como padrão de referência, foi utilizado um termômetro digital constituído por um sensor de resistência de platina de 100 Ω a 0 °C e um indicador digital de temperatura. O termômetro digital foi calibrado no Laboratório de Termometria (Later) do Inmetro e os resultados foram registrados no certificado de calibração DIMCI 0198/2011, emitido em 04/02/11. A Figura 23 mostra dois termômetros de resistência de platina e o indicador digital.



Figura 23 – Termômetros de resistência de platina (esquerda) e indicador digital (direita)

O princípio de funcionamento dos termômetros de resistência baseia-se na variação da resistência dos materiais com a temperatura. O primeiro a utilizar este princípio para medir temperatura foi Willian Siemens em 1871. Contudo, a termometria de resistência de precisão só teve início com a publicação do trabalho de Hugh Callendar em 1887 sobre medição de temperatura com termômetros de resistência. Callendar superou os problemas do termômetro de Siemens mostrando que a resistência de um termômetro de resistência de platina fabricado de modo adequado poderia ser relacionada com as indicações de um termômetro de gás por meio de uma equação de interpolação até cerca de 600 °C. Dentre os três grandes tipos de termômetro (termômetro de líquido em vidro, termopar e termômetro de resistência), o termômetro de resistência de platina é o que apresenta a maior exatidão, possuindo também grande estabilidade e reprodutibilidade (Santos e Petkovic, 2003).

A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2005b) estabelece que verificações necessárias à manutenção da confiança no status da calibração dos padrões de referência, primário, de transferência e de trabalho devem ser realizadas de acordo

com procedimentos e cronogramas definidos. Desta forma, a verificação periódica do termômetro, realizada mensalmente através da medição do valor da resistência do sensor a 0 °C no ponto do gelo, se fez necessária para evidenciar a manutenção da confiança no status de sua calibração, garantindo assim os resultados das medições realizadas.

4.3.1.2.

Procedimento de Calibração

O termômetro padrão foi posto no centro da cuba do banho termostático contendo água destilada como fluido de trabalho. Os termistores foram postos ao redor do termômetro padrão com uma distância radial de 25 mm. A profundidade de imersão do termômetro padrão e dos termistores foi de 70 mm. A calibração foi feita na faixa de 15 °C a 30 °C em intervalos de 2,5 °C. Após a estabilização do banho, foram feitas 60 leituras, a cada 30 s, de todos os termômetros.

4.3.1.3.

Resultados e Incertezas de Medição

Em cada ponto de calibração, a correção foi determinada para cada termistor como sendo a diferença entre os valores médios das indicações do termômetro padrão e do instrumento. Desta forma, foi possível ajustar uma curva de correção para cada termistor.

A incerteza de medição também foi estimada para cada termistor e em cada ponto de calibração. Estas incertezas são de suma importância para a estimativa da incerteza da diferença de temperatura ΔT , fonte de incerteza na determinação da condutividade térmica. Na estimativa de incerteza dos termistores, as seguintes fontes foram levadas em consideração: a calibração do padrão de referência; a repetibilidade das medições do padrão; a repetibilidade das medições do termistor; a resolução da indicação do padrão; a resolução da indicação do termistor; a reprodutibilidade do termistor; a avaliação térmica do banho termostático; e o ajuste da curva de correção do termistor. A reprodutibilidade do termistor foi estimada como sendo a diferença entre as correções obtidas no ponto 20 °C e na sua repetição ao final da calibração. As incertezas referentes à repetibilidade das medições e ao ajuste da curva do termistor foram estimadas, respectivamente, por

meio do desvio padrão experimental da média e do erro padrão da estimativa. Estas equações serão apresentadas no capítulo seguinte.

A Tabela 3 apresenta, para cada ponto de calibração, as temperaturas médias \bar{T} dos termistores, as correções C obtidas por meio das curvas ajustadas e as incertezas expandidas de medição U com uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

Tabela 3 – Temperaturas, correções e incertezas dos termistores (em °C)

Termistor 01			Termistor 02		
\bar{T}	C	U	\bar{T}	C	U
14,956	0,087	0,032	14,912	0,132	0,033
17,441	0,045	0,033	17,422	0,061	0,034
20,009	-0,007	0,034	20,006	-0,003	0,035
22,399	-0,057	0,033	22,412	-0,067	0,034
24,879	-0,103	0,032	24,908	-0,133	0,033
27,454	-0,141	0,030	27,502	-0,189	0,031
29,933	-0,159	0,029	29,994	-0,221	0,031

A Figura 24 apresenta os valores médios de temperatura dos termistores, as respectivas correções em relação ao padrão, as incertezas expandidas e a curva de correção de cada instrumento.

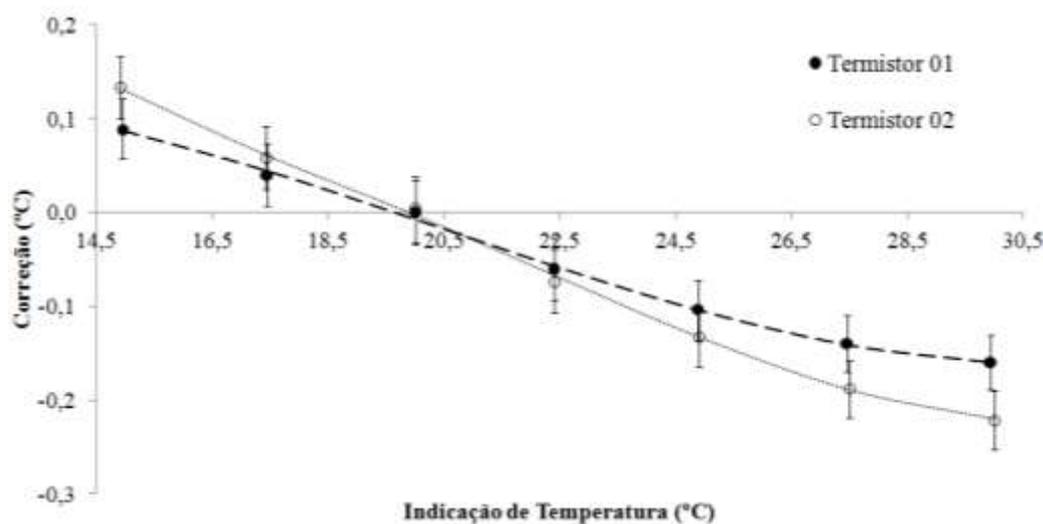


Figura 24 – Curvas de correção dos termistores

4.3.2. Caracterização Dimensional

A caracterização dimensional, que consistiu na medição dos diâmetros dos

sensores de esfera quente por meio de um padrão de referência, foi executada pelo Laboratório de Metrologia Dimensional (Lamed) do Inmetro.

4.3.2.1. Padrão de Referência

As medições foram realizadas por meio de um microscópio de medição Carl Zeiss com mesa de deslocamento, conjunto óptico e tambor micrométrico. O sensor do equipamento foi calibrado por meio de uma régua padrão que, por sua vez, foi calibrada por meio de um laser interferométrico de He-Ne. A Figura 25 mostra a régua padrão e o microscópio.

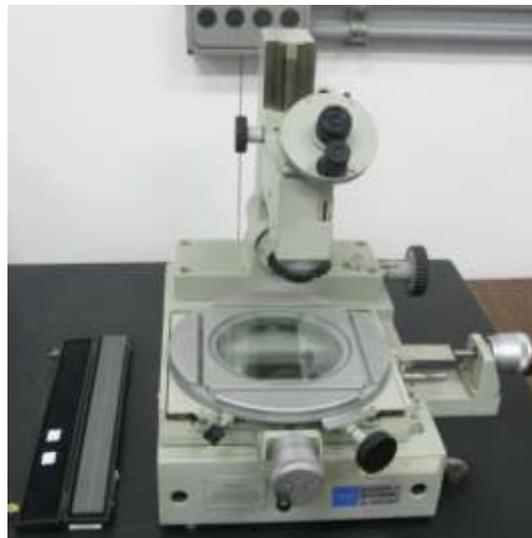


Figura 25 – Régua padrão e microscópio

4.3.2.2. Resultados e Incertezas de Medição

A Tabela 4 apresenta os resultados de medição dos diâmetros d dos sensores de esfera quente e as incertezas expandidas de medição U com uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

Tabela 4 – Diâmetros e incertezas dos sensores

	d (mm)	U (mm)
Sensor 01	2,32	0,03
Sensor 02	2,08	0,03

4.3.3. Caracterização Elétrica

A caracterização elétrica foi realizada no Lahig por meio da comparação dos valores de potência elétrica ajustados nos equipamentos com aqueles medidos por padrões de referência.

4.3.3.1. Padrões de Referência

As medições foram realizadas por meio de um multímetro digital Keithley, modelo 2700, com resolução $6\frac{1}{2}$ dígitos, e de um multímetro digital Hewlett Packard, modelo 3457A, com resolução de $7\frac{1}{2}$ dígitos. Ambos os instrumentos foram calibrados pelo Laboratório de Tensão e Corrente Elétrica (Latce) do Inmetro. Por terem sido calibrados há poucos meses antes de suas utilizações, os multímetros não foram verificados antes das medições.

O multímetro Keithley, mostrado na Figura 26, foi calibrado em resistência de $10\ \Omega$ a $300\ \Omega$, em tensão contínua de $-9\ \text{mV}$ a $10\ \text{V}$, e em corrente contínua de $0,01\ \text{mA}$ a $3\ \text{A}$. Os resultados de resistência foram registrados no certificado de calibração DIMCI 2830/2011, emitido em 21/12/11, e os de tensão contínua e de corrente contínua no certificado de calibração DIMCI 0044/2012, emitido em 11/01/12.



Figura 26 – Multímetro Keithley

O multímetro Hewlett Packard, mostrado na Figura 27, foi calibrado em resistência de $30\ \Omega$ a $300\ \Omega$ e em tensão contínua de $-9\ \text{mV}$ a $100\ \text{mV}$. Os resultados de resistência foram registrados no certificado de calibração DIMCI 0893/2012,

emitido em 10/05/12, e os de tensão contínua no certificado de calibração DIMCI 0841/2012, emitido em 04/05/12.



Figura 27 – Multímetro Hewlett Packard

4.3.3.2. Procedimento de Caracterização

A caracterização foi realizada em 15 pontos na faixa nominal de 1 mW a 14 mW. Esta faixa de avaliação foi mais do que adequada, uma vez que os itens não seriam utilizados além de 14 mW pelos motivos expostos no item 4.5.6.

Os sensores de esfera quente foram posicionados no centro de recipientes com água destilada, que foram mantidos a 20 °C por meio do banho termostático. Valores de potência elétrica foram ajustados nos equipamentos. Para cada valor ajustado, 10 leituras da tensão contínua V e da corrente contínua I na resistência elétrica foram feitas, a cada 30 s, utilizando-se os multímetros de referência. Os valores médios da tensão e da corrente foram utilizados para calcular a verdadeira potência elétrica P de acordo com equação (44).

$$P = IV \quad (44)$$

4.3.3.3. Resultados e Incertezas de Medição

A incerteza de medição foi estimada para cada equipamento em cada ponto de avaliação. Na estimativa, foram levadas em consideração as seguintes fontes de incerteza: a calibração dos padrões em tensão e corrente; a resolução dos padrões em tensão e corrente; a repetibilidade das medições dos padrões em tensão e corrente; a reprodutibilidade do item e os ajustes de curva dos padrões. Para estimativa da reprodutibilidade do equipamento, os pontos 1 mW, 7 mW e 14 mW

foram repetidos e a maior diferença entre os valores medido e ajustado foi adotada. As incertezas referentes à repetibilidade das medições e ao ajuste de curva foram estimadas, respectivamente, por meio do desvio padrão experimental da média e do erro padrão da estimativa. Estas equações serão apresentadas no capítulo seguinte.

A Tabela 5 apresenta, para cada ponto, a potência elétrica ajustada P_A , as potências elétricas P medidas e as incertezas expandidas de medição U com uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

Tabela 5 – Potências, correções e incertezas dos equipamentos (em mW)

P_A	Equipamento 01		Equipamento 02	
	P	U	P	U
14,1	13,11	0,028	13,14	0,035
13,2	12,23	0,028	12,26	0,035
12,2	11,33	0,028	11,35	0,035
11,3	10,47	0,028	10,52	0,035
10,3	9,61	0,028	9,54	0,035
9,4	8,73	0,028	8,70	0,035
8,5	7,86	0,028	7,87	0,035
7,5	6,98	0,028	6,99	0,035
6,6	6,11	0,028	6,07	0,035
5,6	5,23	0,028	5,25	0,035
4,7	4,36	0,028	4,36	0,035
3,8	3,49	0,028	3,50	0,035
2,8	2,61	0,028	2,62	0,035
1,9	1,74	0,028	1,74	0,035
0,9	0,86	0,028	0,87	0,035

4.4. Amostras

Durante a realização desta pesquisa, as seguintes amostras foram utilizadas: água destilada; etanol anidro (pureza em torno de 99,3%); etanol PA (pureza em torno de 95%); solução de 75% de etanol e 25% de água; solução de 50% de etanol e 50% de água; e solução de 25% de etanol e 75% de água.

4.4.1. O Etanol

O etanol (álcool etílico), uma das mais importantes fontes de energia renovável, é uma substância orgânica obtida da fermentação do açúcar existente em matérias primas de origem vegetal, tais como: cana de açúcar, milho, mandioca, beterraba e

outros. No Brasil, grande parte do etanol produzido é proveniente da cana de açúcar. A molécula do etanol é composta por dois átomos de carbono, seis átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio (C₂H₆O), conforme a Figura 28.

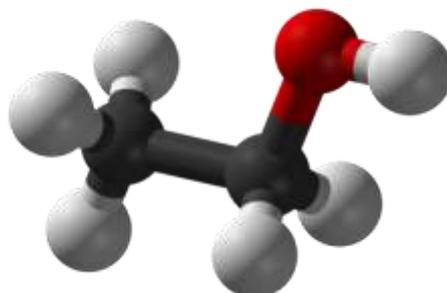


Figura 28 – Molécula do etanol

4.4.2. Preparação e Caracterização das Amostras

A água destilada foi preparada no próprio Lahig por meio de um destilador do tipo Pilsen que produz água com pureza abaixo de 4 μ S/cm. O etanol PA foi obtido de uma indústria química especializada em produtos laboratoriais. As soluções de etanol combustível, com concentrações nominais de 25%, 50% e 75%, foram preparadas pelo Laboratório de Análise Orgânica (Labor) do Inmetro, através do método gravimétrico, e analisadas por meio de cromatografia gasosa. Todas as amostras possuíam volume de aproximadamente 1 L, e foram envasadas em frascos de vidro borossilicato com as mesmas características e dimensões.

Na análise cromatográfica, foi utilizado um cromatógrafo a gás Shimadzu, modelo GC 2010, equipado com autoamostrador e detector de ionização em chama. A injeção foi do tipo *on-column* e o volume de injeção foi de 1 μ L. Para a medição do teor de água, foi utilizado um titulador Karl Fischer coulométrico com solução Hydranal coulomat AG, um eletrodo de geração de corrente de 400 mA e um eletrodo indicador de platina. A faixa de tensão aplicada foi de 50 mV a 70 mV. A titulação foi iniciada após a estabilização do equipamento com uma deriva de 20 μ g/min em 120 s, e finalizada com o valor de ± 5 μ g/min em relação à deriva inicial. A curva de titulação foi realizada com uma medição de pontos a cada 2 s de análise. Os resultados foram registrados no certificado de calibração DIMCI 2527/2012 emitido pelo Labor em 21/12/12.

A Tabela 6 apresenta as concentrações medidas e suas respectivas incertezas expandidas de medição U com uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

Tabela 6 – Concentração das amostras e incertezas de medição

Concentração Nominal de Etanol (%)	Concentração Medida (%)	U (%)
99,3	99,280	0,004
95	94,632	0,001
75	74,4730	0,2143
50	49,6404	0,2862
25	24,8070	0,1509

4.5. Procedimento Experimental

4.5.1. Posicionamento dos Sensores nas Amostras

Para climatização das amostras, os frascos de vidro foram posicionados na cuba do banho termostático descrito no item 4.2. Os sensores de esfera quente dos equipamentos foram individualmente posicionados no centro dos frascos, conforme a Figura 29.



Figura 29 – Frasco com amostra e sensor de esfera quente no interior

De modo a inserir e a manter os sensores no centro dos frascos, tubos plásticos de 6 mm de diâmetro interno foram adaptados nas tampas dos frascos. A

folga existente entre o tubo e o cabo do sensor foi de aproximadamente 21 mm², e a distância entre a extremidade do tubo e o sensor foi de 20 mm. De modo a evitar a infiltração de ar úmido do laboratório para o interior dos frascos por meio do tubo e da tampa, estes itens foram completamente recobertos por meio de película de policloreto de vinila (PVC), seguindo orientações do Labor. Antes da troca dos sensores de esfera quente de um frasco de amostra para outro, estes eram secados cuidadosamente por meio de papel toalha e ar quente com o objetivo de evitar contaminação cruzada.

4.5.2.

Preparação do Banho e Climatização das Amostras

Como fluido de trabalho do banho termostático, água e etanol foram utilizados. A água foi utilizada para as medições com a amostra de água destilada, e o etanol para as medições com as demais soluções. De modo a reduzir a transferência de calor entre o fluido do banho e o ar do laboratório, que é constantemente mantido a 23 °C e com umidade relativa de 60 %, uma tampa de poliuretano foi preparada e utilizada. Todas as medições nas amostras foram feitas utilizando-se a tampa. As Figuras 30 e 31 mostram três frascos no banho termostático sem e com a tampa, respectivamente.



Figura 30 – Frascos no banho termostático sem a tampa



Figura 31 – Frascos no banho termostático com a tampa

Nesta pesquisa, todas as medições foram realizadas a 20 °C e em vários pontos de potência elétrica dentro da faixa de operação dos equipamentos. De modo a garantir que as amostras estivessem adequadamente estabilizadas a 20 °C, estas foram mantidas no banho por mais de 12 h antes do início das medições. A estabilidade foi então confirmada por meio da determinação da diferença entre as medições iniciais de cada ciclo. Em geral, estas diferenças foram menores do que 0,01 °C; porém, em alguns casos, diferenças de aproximadamente 0,02 °C foram encontradas. Todavia, tais valores estão de acordo com a avaliação prévia da variação temporal do banho.

4.5.3. Configuração e Aquisição de Dados

A aquisição das medições de temperatura armazenadas pelos equipamentos e o ajuste dos parâmetros de operação foram realizados por meio do programa computacional fornecido com os itens. Cabe ressaltar que nenhum processamento de dados foi feito por meio deste programa. Os dados foram corrigidos, seguindo as avaliações metrológicas descritas anteriormente, e processados em planilhas eletrônicas e outros programas computacionais. Os seguintes parâmetros foram ajustados para cada ponto de medição: o horário de início, o intervalo entre dois ciclos, a potência elétrica, o número de pontos, o intervalo entre dois pontos e os

pontos de início e término do aquecimento. A Figura 32 mostra a tela do programa de configuração dos equipamentos.

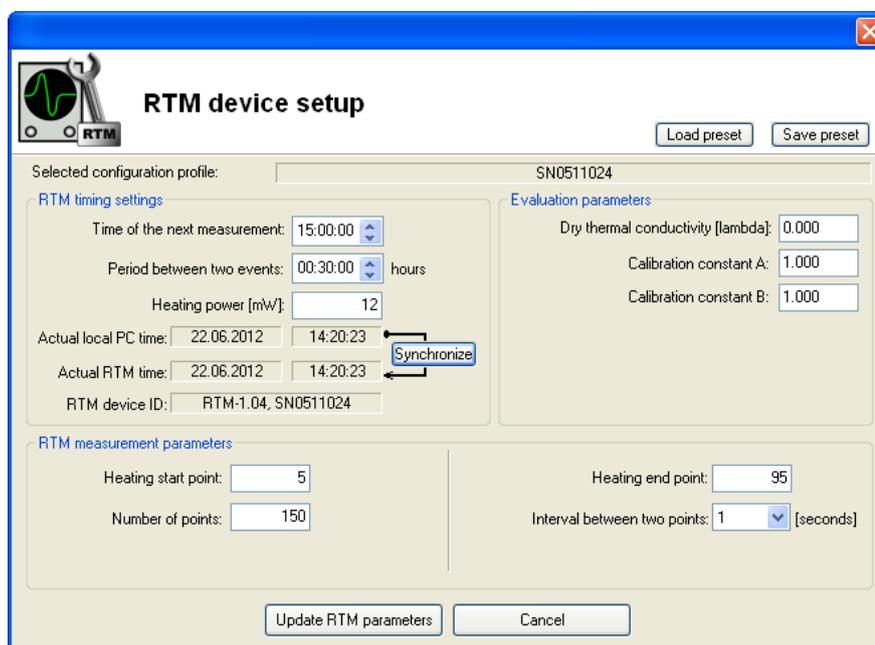


Figura 32 – Tela do programa de configuração dos equipamentos

4.5.4. Parâmetros de Medição

Para cada potência elétrica, no mínimo 4 ciclos de medição foram efetuados. Cada ciclo de medição consiste do monitoramento da temperatura em três etapas: antes, durante e depois do aquecimento da esfera. Foram realizadas 5 medições de temperatura antes do início do aquecimento da esfera, 95 medições durante o aquecimento e 50 medições após o término do aquecimento, totalizando 150 medições por ciclo. O intervalo entre as medições foi de 1 s, logo cada ciclo teve duração de 2,5 min.

De modo que não houvesse influência do aquecimento da amostra durante um ciclo de medição no ciclo seguinte, os intervalos entre o início de um ciclo para o outro foram de 10 min para a água destilada e de 20 min para as demais amostras. Tal fato pôde ser comprovado por meio da comparação da primeira e da última medição de um mesmo ciclo, e da comparação entre a medição inicial de um ciclo com a medição inicial do ciclo anterior. O monitoramento de temperatura durante um ciclo de medição é mostrado na Figura 33.

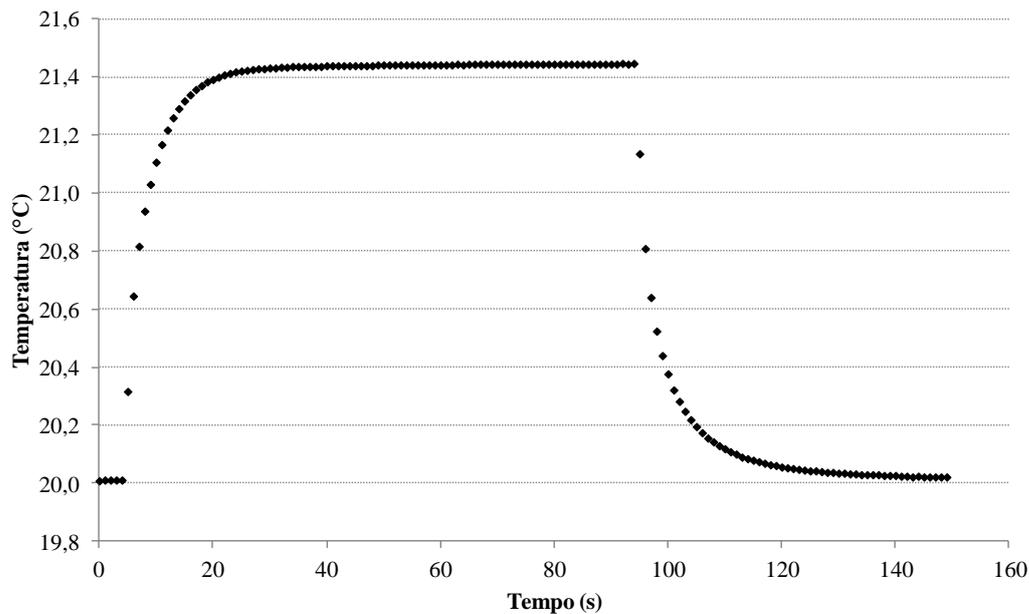


Figura 33 – Monitoramento de temperatura durante um ciclo de medição

4.5.5. Alcance do Regime Permanente

Os valores de condutividade térmica das amostras foram determinados no regime permanente, ou seja, quando suas propriedades são inalteráveis no tempo. Desta forma, a definição do instante a partir do qual este regime é atingido, segundo um determinado critério, é de vital importância.

Durante a calibração dos termistores, onde foram obtidas 60 leituras de 30 em 30 s para cada sensor quando o fluido do banho estava completamente estável, foi determinada para cada termistor a amplitude máxima de temperatura como sendo a diferença entre as temperaturas máxima e mínima. Ou seja, foi observado experimentalmente que, durante trinta minutos em um ambiente estável, todas as medições de temperatura do termistor variaram dentro da faixa definida pela amplitude. Cabe ressaltar que, durante a calibração, a resistência de aquecimento do equipamento não se encontrava em funcionamento, mas que esta se encontrava ativa quando do período de medição no regime permanente, o que poderia causar uma maior variação de temperatura em decorrência da instabilidade na geração de potência elétrica. Porém, quando da caracterização elétrica, foi constatado por meio das medições de tensão e corrente que as variações destes parâmetros são desprezíveis, o que significa que a geração de potência elétrica é bem estável. Logo, foi considerado como início do regime permanente, o instante a partir do

qual as medições de temperatura variavam dentro da amplitude determinada na calibração.

As amplitudes máximas determinadas para os equipamentos 01 e 02 quando da calibração foram, respectivamente, 0,032 °C e 0,048 °C. Todas as medições de temperatura dos dois itens em todas as amostras encontram-se dentro da faixa definida pela amplitude a partir de 22 s após o início do aquecimento da esfera.

4.5.6. Convecção Natural

Baseado na técnica experimental de Schmidt e Milverton (1935) de detecção do surgimento da convecção, trinta valores de potência elétrica foram ajustados nos sensores de esfera quente, na faixa de 1 mW a 14 mW, de modo a observar a relação entre estes valores e os respectivos incrementos de temperatura. Para este teste, três ciclos de medição foram realizados a 20 °C em água destilada e etanol.

No caso da água destilada, foi observado que, para os dois sensores de esfera quente, a relação entre as potências elétricas e os incrementos de temperatura é linear para toda a faixa analisada. Já no caso do etanol, a linearidade entre as potências e os incrementos de temperatura aparenta ser interrompida a partir de 8 mW e 6 mW para os itens 01 e 02, respectivamente, o que é um indício do surgimento da convecção. Os gráficos que relacionam as potências elétricas e os incrementos de temperatura para os sensores encontram-se no Apêndice A.

Para estes pontos, os números adimensionais de Rayleigh (eq. 25), Grashoff (eq. 26), Prandtl (eq. 27) e Nusselt (eq. 28) foram determinados para os três ciclos de medição, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Números adimensionais para a potência elétrica máxima

Item	\dot{Q} mW	Água Destilada					Etanol				
		T_F	Pr	Gr	Ra	Nu	T_F	Pr	Gr	Ra	Nu
		°C	-	-	-	-	°C	-	-	-	-
01	7,9	20,33	6,9	12,8	88,8	3,7	20,70	16,8	54,5	914,0	5,1
		20,33	6,9	13,0	90,5	3,7	20,70	16,8	54,8	917,9	5,1
		20,32	6,9	12,7	88,1	3,7	20,70	16,8	54,7	916,8	5,1
02	5,7	20,30	7,0	8,9	62,0	3,5	20,51	16,8	38,9	653,0	4,8
		20,30	7,0	9,0	62,5	3,5	20,51	16,8	38,6	648,6	4,8
		20,30	7,0	8,9	62,1	3,5	20,51	16,8	38,6	648,6	4,8

Para a execução dos cálculos dos números adimensionais, foram utilizados os raios medidos no Inmetro (Tabela 4) e as propriedades das substâncias obtidas por meio de equações para a temperatura do filme. No caso da água destilada, a massa específica foi calculada de acordo com a equação (22), e a condutividade térmica, o calor específico e a viscosidade dinâmica foram obtidos através da calculadora *online* preparada pelo Comitê Nacional da Rússia da IAPWS (IAPWS, 2012b). No caso do etanol, a massa específica de 789 kg/m^3 foi obtida por interpolação na literatura (Lange, 1967) e a condutividade térmica foi calculada através da equação (18). Já o calor específico c e a viscosidade dinâmica μ foram calculados, respectivamente, pela equação (45) de Zabransky *et al.* e pela equação (46) de Perry e Green citadas em Henke *et al.* (2010). Os coeficientes de expansão volumétrica, tanto para a água destilada quanto para o etanol, foram obtidos no banco de dados *online* Kaye & Laby disponibilizado pelo *National Physical Laboratory* (NPL) (Kaye & Laby, 2012).

$$c = \frac{8,314}{0,04607} \left[15,4028 \ln \left(1 - \frac{T}{513,92} \right) + \frac{0,359101}{\left(1 - \frac{T}{513,92} \right)} + 9,35649 + 25,7454 \frac{T}{513,92} - 41,4812 \left(\frac{T}{513,92} \right)^2 + 80,3298 \left(\frac{T}{513,92} \right)^3 \right] \quad (45)$$

$$\mu = \exp \left(-7,10566 + 1675,13T^{-1} + 0,0103679T - 1,71008 \times 10^{-5}T^2 \right) \quad (46)$$