

## 5 Materiais e Métodos

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento de um sistema multicanal destinado ao estudo da homogeneidade espacial e estabilidade temporal da temperatura em equipamentos da cadeia de frio de sangue e hemocomponentes.

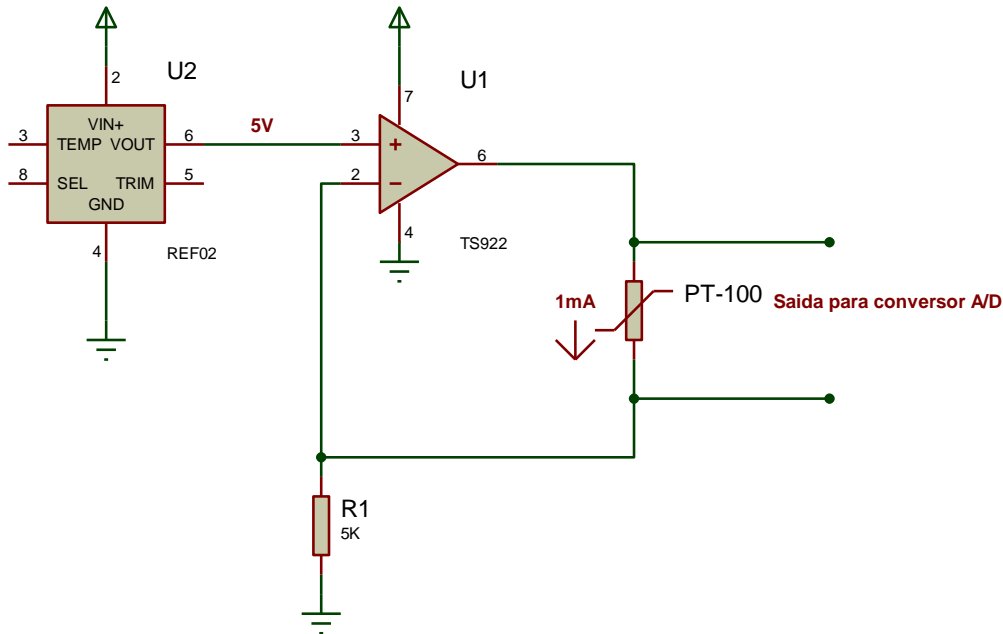
### 5.1. Sistema multicanal para medição de temperatura

Para a montagem de um sistema multicanal de transdutores de temperatura foram utilizados termômetros de resistência de platina do tipo Pt-100, conhecidos como RTDs (*Resistance Temperature Detectors*), os quais se destacam por apresentarem excelente exatidão, precisão e linearidade para baixas temperaturas [6], como as utilizadas em equipamentos da cadeia de frio.

Sabendo-se que sensores do tipo RTD variam sua resistência em função da temperatura, foi montado um circuito eletrônico de conversão com o objetivo de transformar uma variação de resistência em uma variação de tensão. Dessa forma, garantindo-se a passagem de uma corrente constante  $I$  pelo sensor, que tem resistência elétrica  $R$ , pode-se inferir as variações de resistência, as quais são proporcionais às variações de temperatura, medindo-se a tensão  $V$  entre os terminais do sensor. A fim de garantir a passagem de uma corrente de valor constante no RTD, faz-se necessário uma fonte de corrente. Esta fonte é considerada um ponto crítico do circuito, pois deve gerar a mesma corrente independentemente de variações de temperatura, tensão de alimentação e impedância da carga (sensor). Além disso, de acordo com as informações do fabricante, IOPE Instrumentos de Precisão, o sensor PT-100 escolhido (TERMAX 5) deve operar com uma corrente de 1mA.

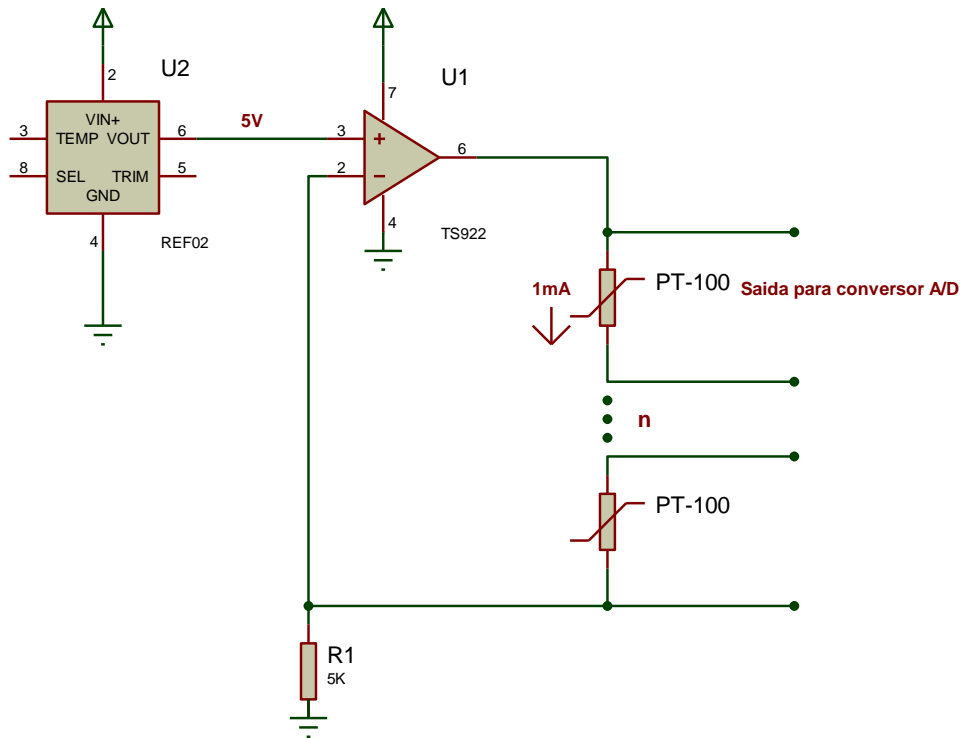
A fonte de corrente foi implementada segundo a configuração apresentada na Figura 15, utilizando-se um chip de referência de tensão REF02 (*Analog Devices*) e um amplificador operacional TS-922 (*STMicroelectronics*). A tensão de saída, ou seja, a diferença de tensão entre os terminais do Pt-100 foi

amostrada por um conversor A/D de 14 bits integrado ao sistema de aquisição (Datalogger - DI-710, Dataq).



**Figura 15: Diagrama esquemático do circuito eletrônico monocanal desenvolvido para transdução de temperatura em tensão.**

O circuito da Figura 15 apresenta a montagem para apenas um sensor. Para a avaliação da distribuição de temperatura no interior do volume de *freezers* foi desenvolvido um sistema multicanal, com oito sensores em série para garantir que a mesma corrente circule por todos. Ressalta-se que a adoção desta topologia implica em certo cuidado na escolha da tensão de alimentação do amplificador operacional. Para que não ocorra saturação do componente, esta deve ser maior do que a soma das diferenças de potencial nos oito sensores, acrescida da tensão de saída do REF02 (5V), a qual aparece sobre o resistor R1 (Figura 15). A montagem proposta para  $n$  sensores pode ser vista na Figura 16.



**Figura 16: Diagrama esquemático do circuito eletrônico multicanal desenvolvido para transdução de temperatura em tensão**

As diferenças de potencial sobre os sensores Pt-100 foram adquiridas por um *datalogger* (Dataq), modelo DI-710. Este modelo possui um conversor analógico-digital de 14 bits, taxa máxima de amostragem de 10 000 amostras/s e permite o ajuste da faixa de tensões de entrada em quatro opções distintas a fim de otimizar a resolução do sistema de acordo com o sinal a ser adquirido:  $\pm 10$  mV,  $\pm 100$  mV,  $\pm 1$  V e  $\pm 10$  V.

O DI-710 possui dois modos de operação: tempo real ou *stand-alone*. O primeiro utiliza-se do software *Windaq* para visualização e armazenamento dos dados por meio de um computador. No segundo modo, o equipamento pode funcionar de forma independente de um computador, armazenando os dados em um cartão de memória do tipo *SD Card*, e os arquivos armazenados podendo ser analisado em um segundo momento. No presente estudo foi utilizado o DI-710 como modo de operador em tempo real. A Figura 17 apresenta, de forma esquemática, o diagrama de aquisição de sinal.

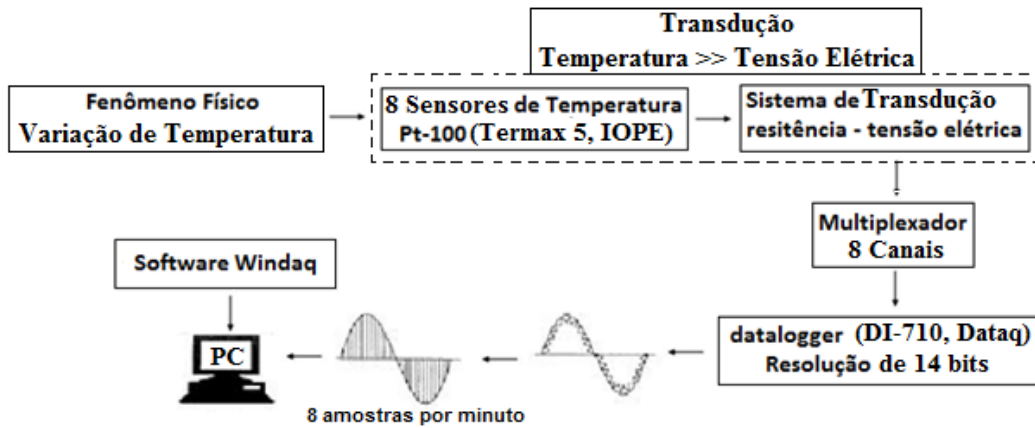


Figura 17: Diagrama de aquisição de sinal

No presente trabalho, para aquisição dos dados provenientes das medições, utilizou-se o datalogger DI-710 (DATAQ) de 14 bits. Este foi configurado para operar na faixa de  $\pm 10$  V, tendo conseqüentemente uma resolução de 1,22 mV. Por sua vez a sensibilidade do sistema, calculada como sendo o coeficiente angular da reta de ajuste apresentada na Figura 18, é de  $(-0,0037)$  V/°C, ou equivalentemente  $0,2702$  °C/mV; logo, a resolução do sistema é de  $0,33$  °C.

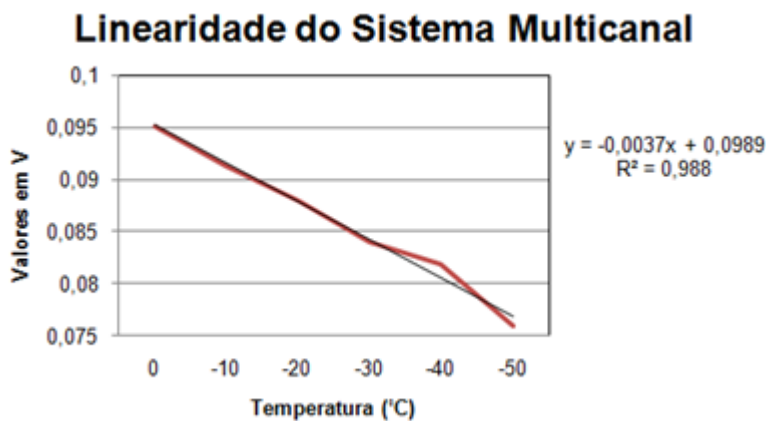


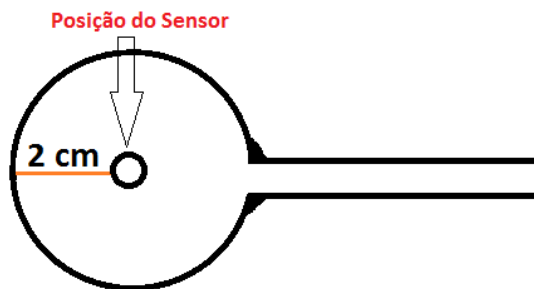
Figura 18: Gráfico da tensão (V) em função da temperatura do sistema multicanal para as temperaturas entre  $0$  °C e  $-50$  °C.

Esse sistema de medição foi configurado para medição direta de temperatura, seu display foi formatado para apresentar as leituras em °C. Desta maneira, o sistema de medição foi calibrado na faixa de  $-80$ °C a  $-10$ °C, em oito

pontos distintos de temperatura. Esta calibração gerou um documento com os valores de erro, fator de abrangência e incerteza, utilizado no presente trabalho.

Para realização do presente trabalho, foi projetada e construída uma estrutura mecânica regulável, capaz de operar como suporte para os oito transdutores ( $S_1$  a  $S_8$ ) e possibilitar o ajuste de posição dos mesmos dentro do volume interno dos *freezers*.

Tendo em vista permitir a aplicação do sistema desenvolvido em equipamentos com diferentes dimensões internas o suporte constituído por hastes reguláveis de acrílico e contendo orifícios com a espessura adequada à fixação dos transdutores (Figura 19) foi projetado com a menor área possível para minimizar a sua influência no fluxo de ar no interior do equipamento.



**Figura 19: Base da haste regulável de acrílico para fixação dos transdutores de temperatura, impedindo o contato direto com a base do compartimento.**

## 5.2.

### **Avaliação da uniformidade e estabilidade da temperatura em *freezers* utilizados na biopreservação de produtos hemoterápicos**

Utilizando o sistema desenvolvido foram realizados estudos da homogeneidade espacial, da estabilidade temporal, além da resposta a perturbações na estabilidade da temperatura no interior de três *freezers* de diferentes marcas e modelos. As medições foram realizadas com os equipamentos sem carga, ou seja, sem bolsas de sangue armazenadas nos compartimentos.

Na Tabela 8 são apresentadas algumas características dos três equipamentos avaliados ( $F_1$ ,  $F_2$ , e  $F_3$ ) como: temperatura de funcionamento ( $T_{func}$ ), posição do sensor fixo do equipamento ( $S_f$ ) para monitoramento da

temperatura e indicação no mostrador; quantidade, dimensões e volume dos compartimentos (gavetas); altura e volume total da câmara.

**Tabela 8: Temperatura de funcionamento, posição de sensor e dimensões físicas dos equipamentos estudados**

	<i>Freezer 1</i>	<i>Freezer 2</i>	<i>Freezer 3</i>
$T_{func}$ (°C)	-85 a -40	-85 a -40	-30 a -20
Posição do termômetro do equipamento ( $S_r$ )	Metade superior do canto posterior esquerdo da gaveta C	Metade superior do canto posterior direito da gaveta C	Metade inferior do canto posterior esquerdo da gaveta B e metade superior do canto posterior esquerdo da gaveta C
Número de Gavetas	quatro (A a D)	cinco (A a E)	cinco (A a E)
Dimensões da gaveta (cm)	30,5 x 55 x 75	24 x 70 x 60	17,5 x 44 x 57
Volume por gaveta (m <sup>3</sup> )	0,13	0,10	0,04
Altura do <i>freezer</i> (cm)	130	128	114
Volume total do <i>freezer</i> (m <sup>3</sup> )	0,54	0,54	0,28
Localização do compressor	acima do compartimento A	acima do compartimento A	abaixo do compartimento E

Os estudos da uniformidade espacial e estabilidade temporal da temperatura dos *freezers* foram realizados em três etapas:

Etapa 1 – Medição simultânea da temperatura em oito posições de medição distribuídas em todo o volume da câmara.

Etapa 2 – Medição simultânea da temperatura em oito posições de medição distribuídas em um único compartimento do *freezer*, sendo o procedimento repetido para todos os compartimentos do equipamento.

Etapa 3 – Medição simultânea da temperatura em oito posições de medição distribuídas em uma pequena região onde as medições das etapas 1 e 2 indicaram os valores extremos de temperatura.

Como cada medição de temperatura foi realizada com o sistema multicanal constituído por 8 transdutores, durante um intervalo de 90min e período de amostragem de 8s, foram adquiridas 5400 leituras do valor da temperatura. Para um equipamento composto por cinco compartimentos, como é o caso dos *freezers*  $F_2$  e  $F_3$ , foram geradas oito planilhas de dados de temperatura constituídas por: uma medição por compartimento (cinco no total), uma medição de temperatura simultânea em todo o volume interno, uma repetição de medição no compartimento A e uma medição de alta resolução espacial.

### 5.2.1.

#### **Etapa 1 da medição da uniformidade e estabilidade da temperatura**

Na primeira etapa de medição da distribuição de temperatura no interior da câmara, os oito transdutores Pt-100 foram posicionados em todo o volume interno do *freezer*, considerando a localização do termômetro do equipamento ( $S_f$ ).

Para o *freezer* composto por quatro compartimentos ( $F_1$ ), dois transdutores foram dispostos em cada uma das gavetas (Figura 20); e para os equipamentos compostos por cinco gavetas ( $F_2$  e  $F_3$ ), um transdutor foi posicionado no centro das gavetas localizadas nos extremo superior (compartimento A) e inferior (compartimento E) e dois sensores foram dispostos em cada uma das gavetas intermediárias B, C e D (Figuras 21 e 22). A estratégia de posicionamento dos transdutores no interior do equipamento consistiu na alternância entre as posições anterior, posterior e central da gaveta, como indicado nas Figuras 20, 21 e 22.

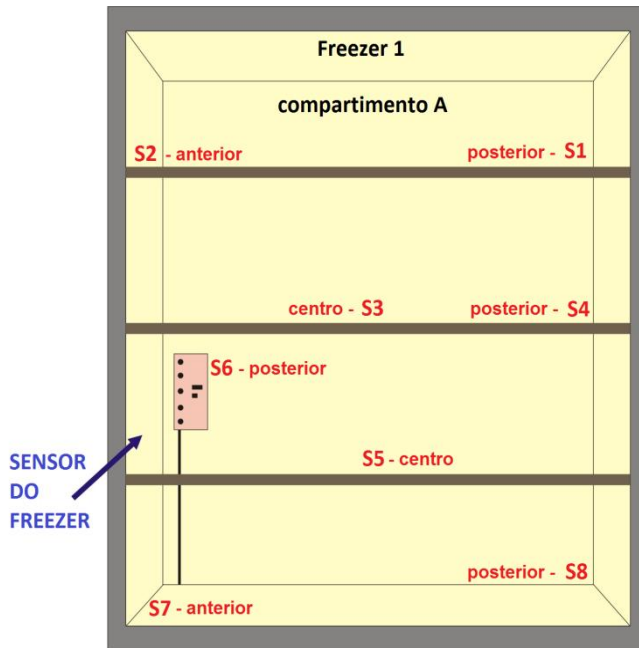


Figura 20: Disposição dos transdutores de temperatura em um equipamento constituído por quatro compartimentos (*freezer 1*), para a primeira etapa de medição realizada simultaneamente em todo o volume interno da câmara.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921356/CA

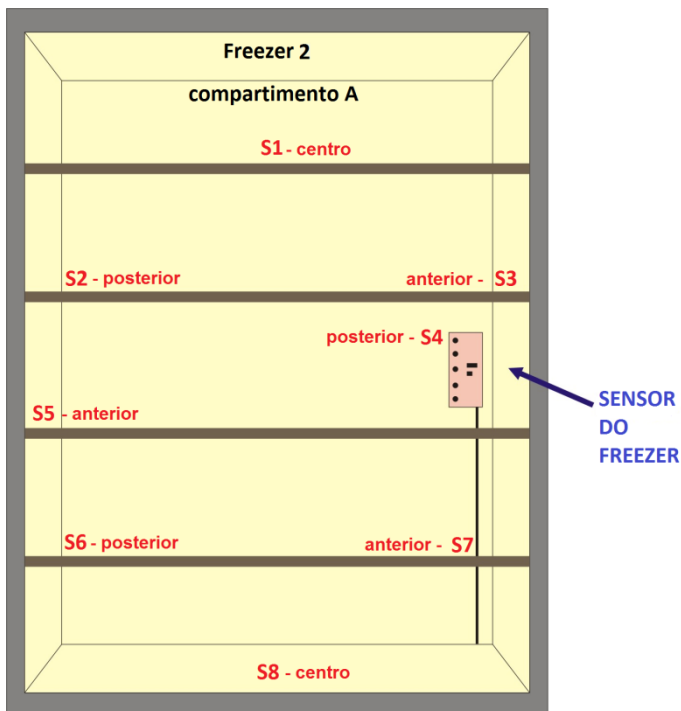


Figura 21: Disposição dos transdutores de temperatura em um equipamento constituído por cinco compartimentos (*freezer 2*), para a da primeira etapa de medição, realizada simultaneamente em todo o volume interno da câmara.



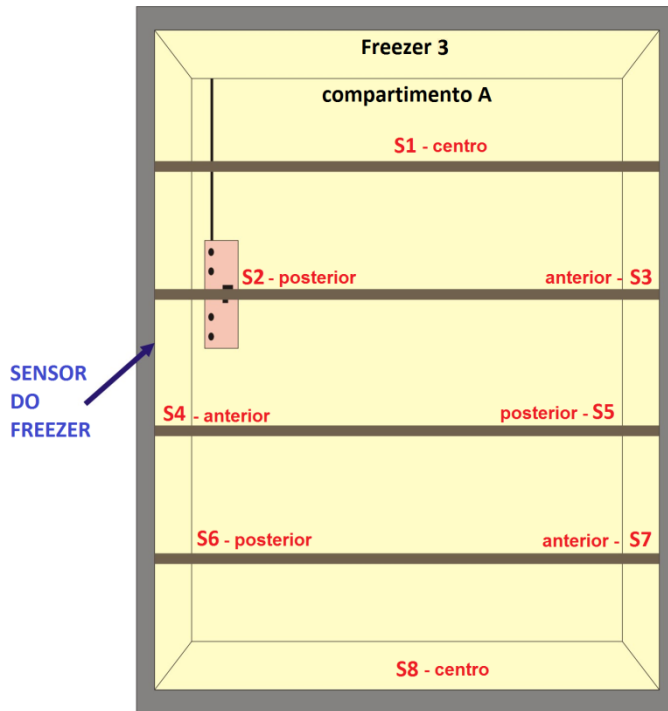


Figura 22: Disposição dos transdutores de temperatura em um equipamento constituído por cinco compartimentos (*freezer 3*), para a da primeira etapa de medição, realizada simultaneamente em todo o volume interno da câmara.

### 5.2.2.

#### Etapa 2 da medição da uniformidade e estabilidade da temperatura

A segunda etapa de medição consistiu na distribuição dos oito dispositivos Pt-100 no interior de um único compartimento do equipamento, repetindo-se o mesmo procedimento e mantendo-se a configuração de distribuição dos transdutores para cada uma das outras gavetas do *freezer*. Após a realização das medições em todos os compartimentos, repetiu-se a medição no compartimento A, objetivando verificar a estabilidade térmica ao longo do tempo. Em cada compartimento, ao menos uma das posições de medição eram coincidentes com alguma posição de medição utilizada na primeira etapa do estudo. Na segunda etapa de medição, assim como na primeira, um dos transdutores do sistema de medição foi posicionado em coincidência com o termômetro do *freezer*. As Figuras 23, 24 e 25 mostram a distribuição dos transdutores  $S_1$  a  $S_8$  para os compartimentos dos *freezers* 1, 2 e 3, respectivamente. Essa distribuição foi idealizada com base na localização do termômetro fixo ( $S_f$ ) dos equipamentos avaliados.

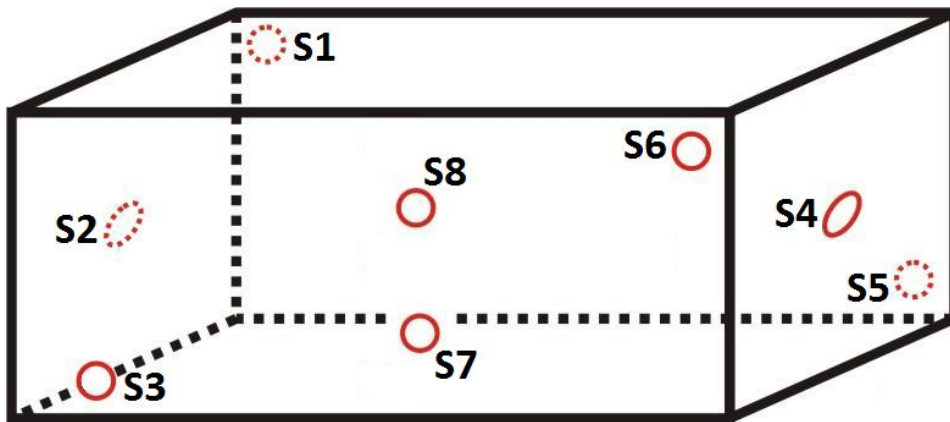


Figura 23: Disposição dos transdutores de temperatura no interior de uma das gavetas do freezer 1, para a realização da segunda etapa de medição da distribuição de temperatura.

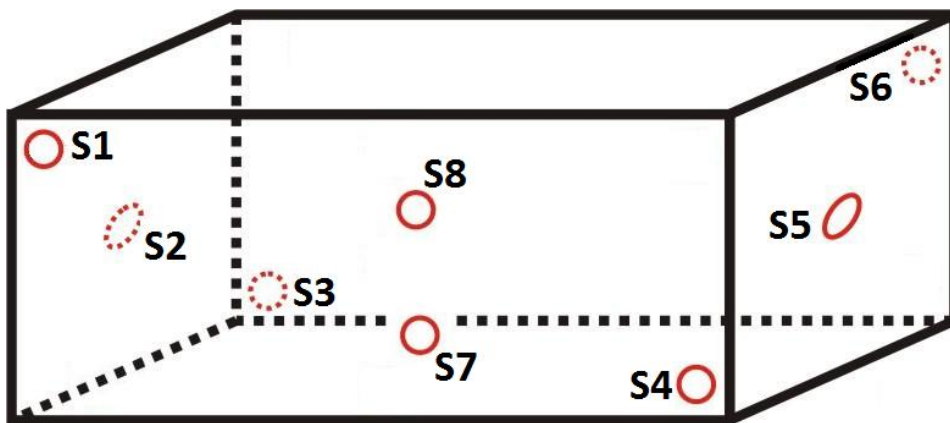


Figura 24: Disposição dos transdutores de temperatura no interior de uma das gavetas do freezer 2, para a realização da segunda etapa de medição da distribuição de temperatura.

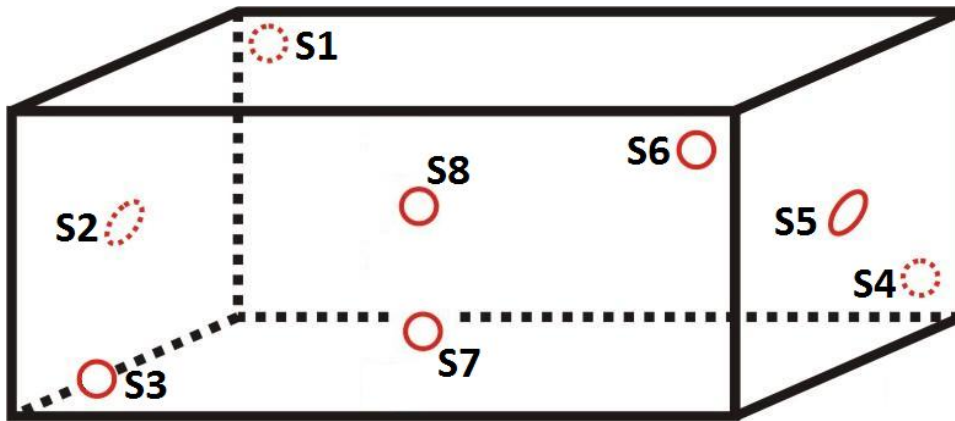


Figura 25: Disposição dos transdutores de temperatura no interior de uma das gavetas do *freezer* 3, para a realização da segunda etapa de medição da distribuição de temperatura.

As Figuras 26, 27 e 28 apresentam, respectivamente, os *freezers* 1, 2 e 3, com a porta fechada (a) e aberta (b). A primeira mostra os sensores posicionados no *freezer* 1 para realização da etapa 1 e na última visualizam-se os transdutores de temperatura distribuídos para a realização da segunda etapa de medição.



(a)

(b)

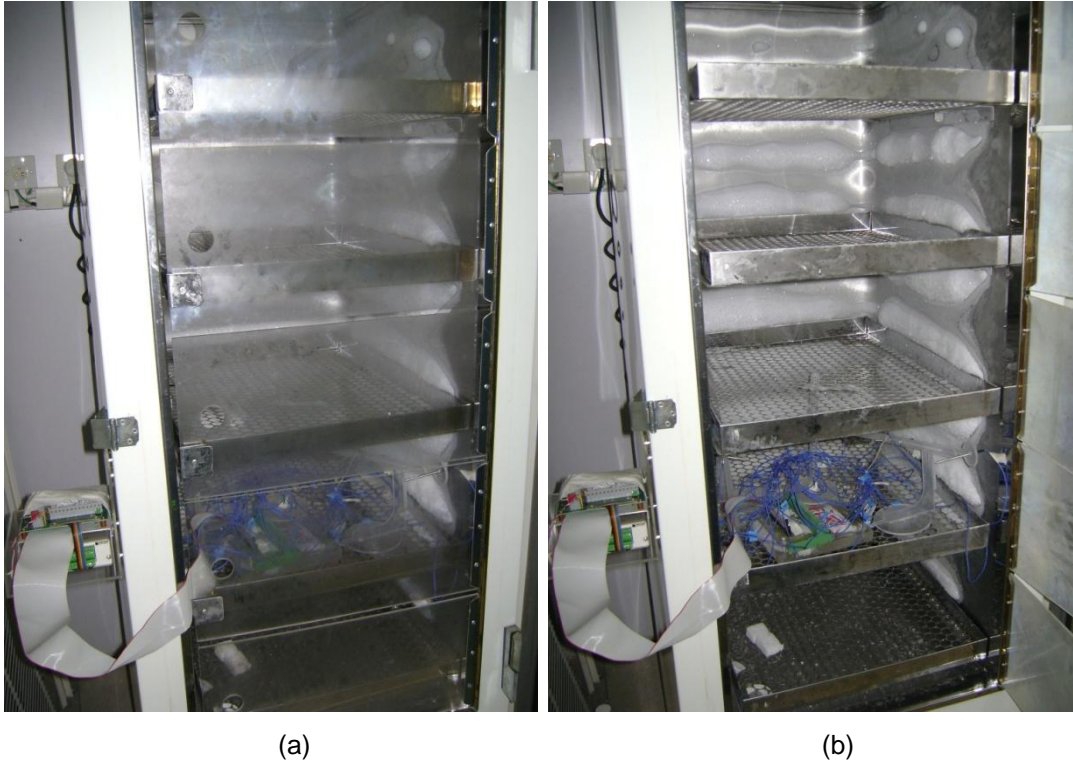
**Figura 26: Freezer 1 com os compartimentos fechados (a) e abertos, com o sistema de medição posicionado para a realização da primeira etapa de medição, e com o posicionamento do transdutor  $S_f$  indicado pela seta (b)**



(a)

(b)

Figura 27: Freezer 2 com os compartimentos fechados (a) e abertos, com o posicionamento do termômetro  $S_f$  indicado pela seta (b).



**Figura 28:** Freezer 3 com os compartimentos fechados (a) e abertos (b). Nas duas situações é possível visualizar o sistema de medição posicionado para a realização da segunda etapa de medição na gaveta D, já que o equipamento possui porta transparente.

A Figura 29 mostra a distribuição dos sensores dentro do compartimento A do freezer 2, preparado para a realização da segunda etapa de medição da distribuição de temperatura no equipamento.



**Figura 29:** Posicionamento dos transdutores de temperatura no suporte regulável, para a realização da segunda etapa de medição de distribuição da temperatura no compartimento A do freezer 2.



### 5.2.3.

#### Etapa 3 da medição da uniformidade e estabilidade da temperatura

A terceira etapa de medição de temperatura, com os transdutores dispostos com maior resolução espacial, foi realizada nas duas regiões onde os extremos de temperatura foram observados durante as medições da primeira e segunda etapa. Tais regiões de medição correspondem na etapa 1, no *freezer* 1, às posições ocupadas pelos transdutores  $S_2$  (no compartimento A) e  $S_7$  (no compartimento D), para o *freezer* 2 os pontos coincidentes foram os transdutores  $S_3$  na etapa 2 (compartimento A) e transdutor  $S_4$  (compartimento E) e para o terceiro *freezer* os pontos coincidentes foram na segunda etapa de medição (compartimento A) transdutor  $S_4$  e transdutor  $S_3$ . Estes pontos coincidentes estão apresentados no quadro 1.

Nestas medições de alta resolução, os sensores  $S_1, S_2, S_3, S_4$  (Figura 30a) foram posicionados no compartimento A para todos os equipamentos, enquanto os sensores  $S_5, S_6, S_7, S_8$  (Figura 30b) foram distribuídos na região correspondente do compartimento mais inferior do *freezer*, compartimento D ( $F_1$ ) ou E ( $F_2$  e  $F_3$ ).

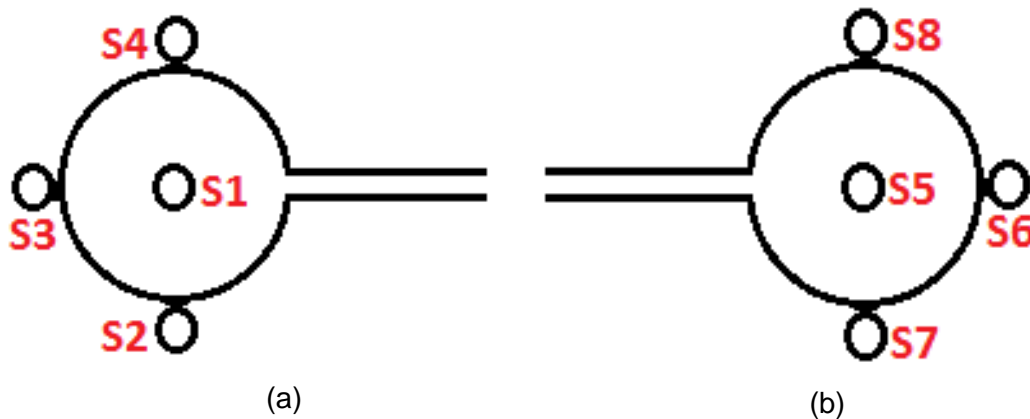


Figura 30: Disposição dos sensores  $S_1$  a  $S_4$  na base do suporte de acrílico para realização da terceira etapa de medição (maior resolução espacial) no compartimento A (a) e no compartimento D para  $F_1$  ou E para  $F_2$  e  $F_3$  (b).

No quadro 3 são apresentadas as posições de medição coincidentes na primeira e segunda etapas, para os *freezer* 1, 2 e 3, informando também quais os transdutores de temperatura localizados próximos ao termômetro do *freezer*, em cada etapa de medição.

**Quadro 3: Pontos coincidentes nas três etapas de medição de temperatura para os freezers 1, 2 e 3.**

<b>Freezer</b>	<b>Compartimento</b>	<b>Etapa</b>	<b>Posições de medição coincidentes na primeira, segunda e terceira etapas de medição de temperatura</b>
<b>F<sub>1</sub></b>	compartimento A	etapa 1	transdutor <b>S<sub>2</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>3</sub></b>
	compartimento B	etapa 1	transdutor <b>S<sub>3</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>7</sub></b>
	compartimento C	etapa 1	transdutor <b>S<sub>5</sub> e S<sub>6</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>1</sub> e S<sub>7</sub></b>
	compartimento D	etapa 1	transdutor <b>S<sub>7</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>3</sub></b>
	compartimento A	etapa 1	transdutor <b>S<sub>2</sub></b>
		etapa 3	transdutor <b>S<sub>1</sub> a S<sub>4</sub></b>
	compartimento C (localizado <b>S<sub>f</sub></b> )	etapa 1	transdutor <b>S<sub>6</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>1</sub></b>
	compartimento D	etapa 1	transdutor <b>S<sub>8</sub></b>
		etapa 3	transdutor <b>S<sub>5</sub> a S<sub>8</sub></b>
<b>F<sub>2</sub></b>	compartimento A	etapa 1	transdutor <b>S<sub>1</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>7</sub></b>
	compartimento B	etapa 1	transdutor <b>S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>3</sub> e S<sub>4</sub></b>
	compartimento C	etapa 1	transdutor <b>S<sub>4</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>6</sub></b>
	compartimento D	etapa 1	transdutor <b>S<sub>6</sub> e S<sub>7</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>3</sub> e S<sub>4</sub></b>
	compartimento E	etapa 1	transdutor <b>S<sub>8</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>7</sub></b>
	compartimento A	etapa 2	transdutor <b>S<sub>3</sub></b>
		etapa 3	transdutor <b>S<sub>1</sub> a S<sub>4</sub></b>
	compartimento C (localizado <b>S<sub>f</sub></b> )	etapa 1	transdutor <b>S<sub>4</sub></b>
		etapa 2	transdutor <b>S<sub>6</sub></b>
compartimento E	etapa 2	transdutor <b>S<sub>4</sub></b>	
	etapa 3	transdutor <b>S<sub>5</sub> a S<sub>8</sub></b>	
<b>F<sub>3</sub></b>	compartimento A	etapa 1	transdutor <b>S<sub>1</sub></b>



	etapa 2	transdutor $S_7$
compartimento C	etapa 1	transdutor $S_4$ e $S_5$
	etapa 2	transdutor $S_3$ e $S_4$
compartimento E	etapa 1	transdutor $S_8$
	etapa 2	transdutor $S_7$
compartimento A	etapa 2	transdutor $S_4$
	etapa 3	transdutor $S_1$ a $S_4$
compartimentos B e C (localizado $S_f$ )	etapa 1	transdutor $S_2$
	etapa 2	transdutor $S_1$
compartimento E	etapa 2	transdutor $S_3$
	etapa 3	transdutor $S_5$ a $S_8$

A uniformidade espacial da temperatura (gradiente) no volume interno dos equipamentos da cadeia de frio foi avaliada, conforme orientado no DOQ-CGCRE-028, pela determinação do maior desvio padrão experimental das medições de todos os transdutores de temperatura, num dado momento [44]. O documento destaca que se o valor desvio padrão experimental for discrepante, deve-se assumir a maior diferença entre os valores médios de temperatura obtidos.

A estabilidade térmica ao longo do tempo nas três câmaras também foi avaliada de acordo com o DOQ-CGCRE-028, o qual determina que seja a maior variação temporal da temperatura, obtida por um mesmo transdutor, por um período de tempo após o equipamento ter atingido o equilíbrio térmico. O intervalo de tempo de medição recomendado por vários documentos técnicos nacionais ou internacionais é de 30 min [44,46,47,50], Porém, no presente trabalho, as medições foram realizadas durante um intervalo de tempo 90 min, período três vezes maior do que o indicado pelos documentos técnicos recém publicados.

### 5.3.

#### **Análise de Resposta a Perturbações na Estabilidade Térmica**

Para estudo preliminar do comportamento da temperatura das câmaras térmicas mediante as perturbações a que são normalmente submetidas a cada abertura da câmara para acesso ou depósito de hemoterápicos, foi realizada a seguinte medição.

Os três *freezers* ( $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ ) foram submetidos ao distúrbio de abertura da porta, quando sua temperatura estava estabilizada. Com os transdutores de temperatura posicionados no compartimento B para os *freezers*  $F_1$  e  $F_3$  e compartimento A para o  $F_2$ , todos em equilíbrio térmico, realizaram-se registros da temperatura durante o distúrbio de abertura e fechamento da porta.

O registro da temperatura se iniciou antes da abertura da porta da câmara térmica, mantendo-se a porta aberta até que o transdutor fixo do equipamento ( $S_f$ ) registrasse uma elevação de 2°C. Após a porta fechada, a aquisição dos dados da temperatura foi mantida até que uma redução de 1°C fosse indicada pelo transdutor  $S_f$ .

#### 5.4. Análise Estatística das Medidas Térmicas

Com o objetivo de avaliar metrologicamente as temperaturas indicadas pelos *freezers* avaliados no presente trabalho, de acordo com Portaria n° 1353/11 do Ministério da Saúde e o DOQ-CGCRE-028 de 2011, foi necessário identificar as componentes de erro de natureza sistemática e/ou aleatória da medição de temperatura, calcular a uniformidade e a estabilidade apresentadas no armazenamento de sangue e hemocomponentes além de estimar a incerteza de medição da temperatura.

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), a incerteza de medição é o “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas” [VIM]. A mesma pode ser classificada como sendo do tipo A ou tipo B.

A avaliação da incerteza de medição do Tipo A é o método que emprega uma análise estatística de uma série de observações repetidas (repetitividade) no momento do ensaio/calibração, podendo ser expressa pelo desvio padrão experimental da média.

A avaliação da incerteza de medição do Tipo B é o método que emprega outros meios que não a análise estatística de uma série de observações repetidas no momento do ensaio/calibração. Nesse caso, a avaliação da incerteza é baseada em outros conhecimentos, tais como: dados históricos de desempenho do método de medição; incertezas herdadas da calibração dos equipamentos e padrões; especificações dos equipamentos e padrões; faixa de condições ambientais, entre outros [51].

Para efetuar a estimativa da incerteza de medição, é necessário primeiramente identificar suas fontes, quantificar seus componentes, calcular as incertezas combinada e expandida [51].

A incerteza combinada ( $U_{combinada}$ ) é obtida pela composição quadrática das incertezas do tipo A e B. A incerteza expandida ( $U_{expandida}$ ) é resultado do produto da incerteza combinada pelo fator de abrangência  $k$  para o nível de confiança desejado.

Uma boa maneira de identificar as fontes de incerteza é utilizar o diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito [62]. Assim, para caracterizar a incerteza do processo de medição, é necessário avaliar, dentre suas fontes, quais afetam o resultado de medição e quantificar estes componentes. A Figura 31 apresenta o diagrama de Ishikawa adaptado para estimativa de incerteza de medição do presente trabalho.

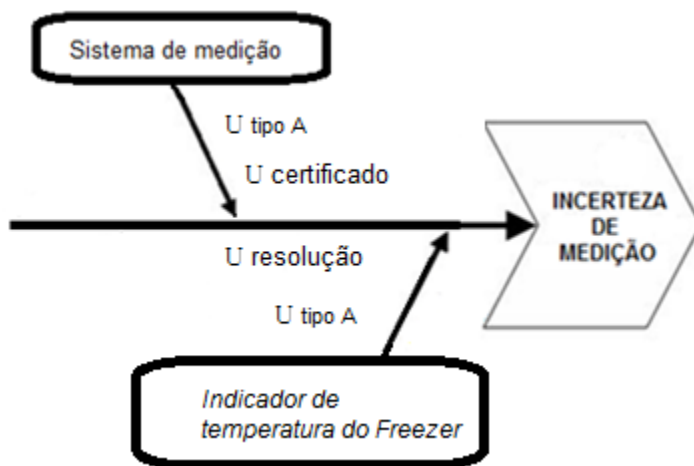


Figura 31: Diagrama de causa e efeito, aplicado à incerteza de medição freezer. Adaptado de [52].

Após a identificação das fontes de incerteza, é necessário quantificá-las. Utilizando o programa *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS), versão 17.0, foi calculada média, mediana, moda e desvio padrão ( $s$ ) dos equipamentos por compartimento e para todo o volume interno dos freezers.

As incertezas da repetitividade (Tipo A) do indicador de temperatura do freezer e do sistema de medição foram obtidas por meio da Equação 13.

$$U_{repetitividade} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

onde  $n$  é a quantidade de medidas.

A incerteza da resolução foi calculada considerando que o sensor era digital, sua distribuição é retangular (ou uniforme) e a fórmula usada é:

$$U_{\text{resolução}} = \frac{\text{resolução}}{2\sqrt{3}} \quad (14)$$

A incerteza apresentada documento de calibração é a incerteza expandida no nível de confiança de 95,45%. Para combinar essa incerteza é necessário reduzi-la ao grau de confiabilidade de 68%. A redução ocorre através da divisão pelo fator de abrangência  $K_p$  declarado no documento.

$$U_{\text{comb.}(certificado)} = \frac{U_{\text{exp}(certificado)}}{K_p(\text{certificado})} \quad (15)$$

Após a quantificação das incertezas atribuídas ao processo de medição, é necessário combiná-las conforme a Equação 16 [51]:

$$U_{\text{combinada}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2} \quad (16)$$

Onde  $u$  é a incerteza atribuída e então calcular a incerteza expandida, que é o valor da incerteza combinada multiplicada pelo fator de abrangência na probabilidade desejada. Para determinar tal fator é necessário calcular o grau de liberdade efetivo da medição segundo a Equação 17.

$$V_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{combinada}}^4}{\frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_n^4}{v_n}} \quad (17)$$

Onde  $v$  é igual ao número de leituras utilizado para calcular o desvio-padrão menos um:

$$v = n - 1 \quad (18)$$

Com o valor do grau de liberdade efetivo determinado, consulta-se a tabela de  $t$  de Student (vide Anexo 1) para associar tal grau de liberdade com o correspondente fator de abrangência ( $k_p$ ) conforme o grau de confiabilidade

desejado. Com os valores de incerteza combinada e de fator de abrangência já é possível estimar o valor da incerteza expandida, seguindo a Equação 19:

$$U_{\text{expandida}} = U_{\text{combinada}} \times k_p \quad (19)$$

O resultado de uma medição (RM) é composto pela média corrigida das indicações ( $x_{\text{corrigida}}$ ), no qual erros sistemáticos são eliminados, com sua respectiva incerteza ( $U_{\text{expandida}}$ ):

$$RM = x_{\text{corrigida}} \pm U_{\text{expandida}} \quad (20)$$

O resultado de medição precisa obedecer duas regras relacionadas à sua grafia:

**Regra 1** - A incerteza de medição deve ser arredondada para conter no máximo dois algarismos significativos. Não importa quantas casas decimais resultem.

**Regra 2** - A média corrigida (também chamada de resultado-base) deve ser arredondada para conter o mesmo número de casas decimais da incerteza da medição. Não importa quantos algarismos significativos resultem [51].

A uniformidade térmica calculada corresponde ao maior desvio padrão experimental das medições de todos os transdutores de temperatura, num dado momento. Se o valor desvio padrão experimental foi discrepante, assumiu-se a maior diferença entre os valores médios de temperatura obtidos. E a estabilidade térmica foi determinada pelo maior desvio padrão da temperatura, obtida por um mesmo transdutor, por um período de pelo menos 90 minutos após a câmara ter atingido o equilíbrio térmico [44].