

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA AJUSTE DE SENSORES DE TEMPERATURA

Félix Borges¹

Luan de Campos Corrêa²

Resumo: Atualmente o uso de sensores de temperatura na indústria se torna essencial para diversos processos de fabricação e principalmente para se obter os resultados desejados. Porém esses sensores apresentam incertezas que se tornam gradativas ao longo de seu uso e assim o objetivo desse trabalho é conhecer esses erros e ajustá-los. Para realização do processo de ajuste dos sensores utilizou-se um sistema de medição composto por um sensor termopar tipo K calibrado como referência, o *software* LabVIEW® e a placa Arduino® onde foi colocado também um sensor tipo K, porém sem calibração afim de medir os valores que os dois sensores apresentaram a cada ponto de medição escolhida. As medições feitas em temperaturas abaixo de 200 °C não apresentaram valores conclusivos, então foram feitos testes em um forno até atingir medições em torno de 1000 °C onde se conheceu os valores de incerteza do sensor a ser calibrado. Foram criados um procedimento e um relatório onde devem ser anotadas as medições, para que o sistema possa ser utilizado posteriormente e de forma correta. O sistema de medição contribui para a necessidade interna da Faculdade SATC possibilitando que ele possa realizar os ajustes necessários e utilizar esses sensores em projetos da instituição.

Palavras-chave: Sistema de medição. LABVIEW®. Incerteza. Procedimento.

1. INTRODUÇÃO

No campo de metrologia atualmente, o uso de sensores como meio de medição se destaca em virtude de seu preço normalmente acessível e atingir resultados precisos de forma rápida e eficaz. Além disso, o uso de sistemas de medição nos quais se possa analisar os dados que o sensoriamento obtém, se torna um atrativo para empresas que buscam melhorias em processos e produto. No entanto, esses sensores perdem eficiência devido ao seu uso prolongado, a sua instalação, entre outros e isso acaba gerando erros em medições, que em determinada escala causa danos a um produto ou em sua qualidade final, por exemplo. Quando isso acontece é necessário realizar o ajuste do sensor, fazendo que

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: Félix-bor@hotmail.com

² Prof. Me. Luan de Campos Corrêa. E-mail: luan.correa@satcedu.com.br

ele passe por um processo onde retome suas referências e possa ser usado novamente, ou em casos mais severos, sua substituição.

A instituição de ensino Faculdade SATC elabora internamente diversos projetos de estudo em parceria com colaboradores internos e externos onde se faz necessário o uso de sensores e instrumentos que devem estar devidamente ajustados. Projetos como o Baja SAE e INOWATTIS são exemplos onde se usam sensores para diversas aplicações. Dentre eles, estão sensores de medição de temperatura como termopares. Como explica Gonçalves Júnior e Sousa (2008), a confiabilidade no resultado das medições depende de que o sistema de medição seja verificado periodicamente, assim como a caracterização dos erros sistemáticos e aleatórios são necessários para se obter resultados mais confiáveis.

Buscar melhorias para o setor de metrologia da Faculdade SATC se faz fundamental onde o desenvolvimento de um sistema de medição e ajuste de sensores de temperatura, permitirá que esse processo seja realizado com uma frequência maior e internamente, excluindo a necessidade de enviar sensores a laboratórios externos o que reduz custo e tempo para o seguimentos de projetos, por exemplo. Além disso, o sistema se torna didático aos alunos que estudam as áreas da metrologia e desenvolvimento de programas nesse meio.

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados na qual será possível o ajuste de sensores de temperatura por meio de um sensor padrão como referência, com auxílio do *software* LabVIEW® no processo será adotado normas específicas como ASTM E220, ASTM 2730 e ASTM E230M, e será criado um procedimento, gerando maior agilidade para a necessidade interna da Faculdade SATC.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compressão do projeto a ser realizado, o embasamento teórico constitui-se de etapas tais como a descrição dos componentes utilizados, como o termopar, aquisição de dados, o *software* responsável, o uso das normas para tais etapas do processo, além do procedimento para o ajuste de sensores onde será possível ser realizado de forma simples e prática.

2.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

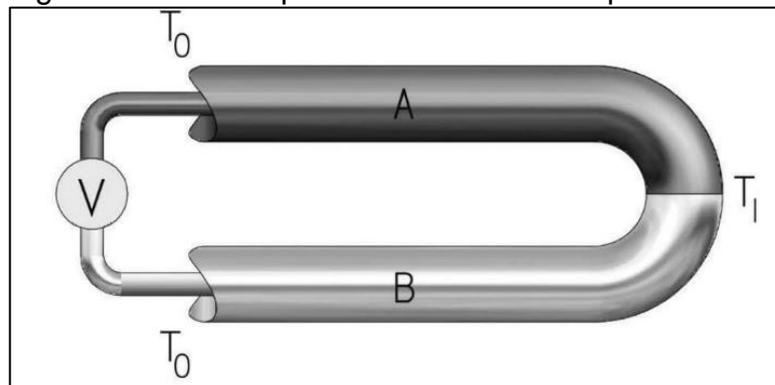
De acordo com Asad *et al.* (2011) apud Gesteira (2014) a obtenção de dados confiáveis em um teste necessita da exatidão dos instrumentos utilizados nas medições. Um sistema de medição e aquisição de dados é uma combinação da qualidade do dispositivo de aquisição de dados, sensores, condicionamento de sinais e qualidade da calibração de cada componente utilizado.

Neste Capítulo será salientado os componentes utilizados no sistema de medição onde será possível o ajuste de sensores de temperatura descalibrados.

2.1.1 Termopar

O principal componente usado para o processo de calibração é u sensor termopar que para Kerlin e Johnson (2012), é basicamente a união de dois fios de diferentes materiais unidos em uma das extremidades conforme apresenta a Fig. 1.

Figura 1 - Vista esquemática de um termopar



Fonte: Kerlin e Johnson, (2013, p.39)

O fio produz uma tensão que aumenta sua magnitude de acordo com a diferença de temperatura entre a extremidade unida (T_1) e a outra onde está aberta (T_0). Para a determinação dos valores de temperatura, é necessário um instrumento que leia a tensão de Força Eletromotriz (Fem), produzida em milivolts pelo termopar em uma condição específica de temperatura (Manso, 2013).

2.1.2 Aquisição de dados

De acordo com Grandó (2013), o sistema de aquisição de dados faz com que um fenômeno físico se transforme em um sinal elétrico e esse convertido em formato digital para que um computador possa interpretá-lo. Esses dispositivos podem possuir tanto entradas quanto saídas para sinais analógicos e digitais, de acordo com seu fabricante.

Sistemas de aquisição de dados são destinados para transformação dos parâmetros iniciais de processos tais como sensores, em sinais digitais equivalentes, adequado para o processamento posterior em um computador. Os sistemas de aquisição de dados conseguem lidar com praticamente todas as grandezas físicas e químicas devido às inúmeras variedades de sensores e transdutores existentes (Kirianaki, *et al*, 2002).

Para a leitura dos sinais elétricos emitidos pelo sensor, utiliza-se a plataforma Arduino® onde a mesma é composta de uma placa eletrônica e de um ambiente de desenvolvimento, para criação da programação (Pinto e Degasperi, 2013).

2.1.3 Software LabVIEW®

Para *National Instruments* (2013) apud Gesteira (2014), o *software* realiza a conexão entre computador e usuário, uma vez que o mesmo possa compreender e analisar os dados de medição. Diferente de outras linguagens de programação, onde instruções com base em linhas de texto determinam sua execução, o LabVIEW® utiliza o fluxo de dados obtidos e por meio deles é executado (Grandó, 2013).

Programas em LabVIEW® são compostos basicamente pelo painel frontal onde contém sua interface, oferecendo uma boa apresentação gráfica e por um diagrama de blocos contendo o código gráfico do sistema onde o programa funciona. O *software* tem performance comparada com linguagens de programação de alto nível (Silva, 2009).

2.2 NORMAS PARA ELABORAÇÃO

Segundo INMETRO (2003) *apud* Manso (2013), o processo de calibração consiste em uma operação que estabelece, sob condições específicas, a relação de valores obtidos por um instrumento de medição com uma medida ou material de referência, sendo essa estabelecida por padrões. No entanto, para ASTM E220 (2013), a calibração baseada na comparação consiste em medir a força eletromotriz do termopar que está sendo calibrado em um meio isotérmico, e medindo simultaneamente a temperatura submetida com um termômetro de referência. Contudo, o método de calibração de sensores depende de fatores cruciais como: o ambiente onde estarão submetidos, estabilidade e uniformidade térmica para maior coerência dos valores e repetição de medições afim de que se possa elaborar e corrigir possíveis incertezas de medição junto a um equipamento de referência (ABNT NBR 14610, 2000).

Conforme descrito em seu manual, para ASTM (1993) qualquer tipo de termopar calibrado conforme ITS-90 (*International Temperature Scale*), pode ser usado como referência para calibração, onde sua escolha irá depender da faixa de temperatura que ele atua, a precisão esperada da calibração e ambiente em que estará submetido.

ASTM 2730 (2015), explica que além da medição realizada pela força eletromotriz do termopar, é necessário um método de compensação de temperatura, uma vez que no ponto de conexão elétrica do termopar precisa ser adicionado ou subtraído tensão para corrigir sua diferença em relação a 0 °C e retornar o valor correto de temperatura.

Para todo processo envolvendo medição, é de extrema necessidade uma tolerância de erros em relação a um valor, no qual é descrito conforme Tab. 1

Tabela 1 – Tolerância padrão de acordo com o tipo de termopar

Tipo de termopar	Faixa de temperatura [°C]	Tolerância padrão
T	0 a 370	± 1,0 °C ou ± 0,75 %
J	0 a 760	± 2,2 °C ou ± 0,75 %
E	0 a 870	± 1,7 °C ou ± 0,75 %
K ou N	0 a 1260	± 2,2 °C ou ± 0,75 %
R ou S	0 a 1480	± 1,5 °C ou ± 0,25 %
B	870 a 1700	± 0,5 %

Fonte: Adaptado de ASTM E230M, (2017 p.6).

Conforme recomendado pela ABNT NBR 13370 (2013), para termopares com materiais não nobres como tipo K e N por exemplo, o processo para calibração consiste em inserir o termopar no meio térmico com temperatura ambiente, aquece-lo cerca de 10% a mais que a temperatura de trabalho e manter até estabilizar e por fim resfriar o termopar até 100°C retirando-o lentamente. A norma também expressa que é necessários pelo menos 5 pontos de temperatura ao longo de sua faixa de medição, para posteriormente realizar os ajustes necessários.

Por fim, se faz necessário um conjunto de etapas e informações descritas, quando se realizar a calibração de qualquer sensor de temperatura. Dentre essas informações, algumas como por exemplo; descrição do método de teste, desvios dos valores padrões, informações sobre o sensor utilizado, condições do ambiente, rastreabilidade de calibração conforme padrão SI (Sistema Internacional de Unidades), concordância com escalas de temperatura como ITS-90 entre outros (ASTM E2623, 2014).

2.3 PROCEDIMENTO PARA PROCESSO DE AJUSTE

De acordo com Vidal (2009), o uso de método de calibração por meio de comparação entre um termopar de referência já calibrado e outro com a necessidade de ajuste, é o meio mais comum e viável na indústria uma vez que não necessita de testes laboratoriais. Nesse processo, mede-se o desvio padrão do termopar para diferentes temperaturas de operação e, ao longo das horas de uso para uma mesma temperatura (ARAÚJO FILHO, 1999).

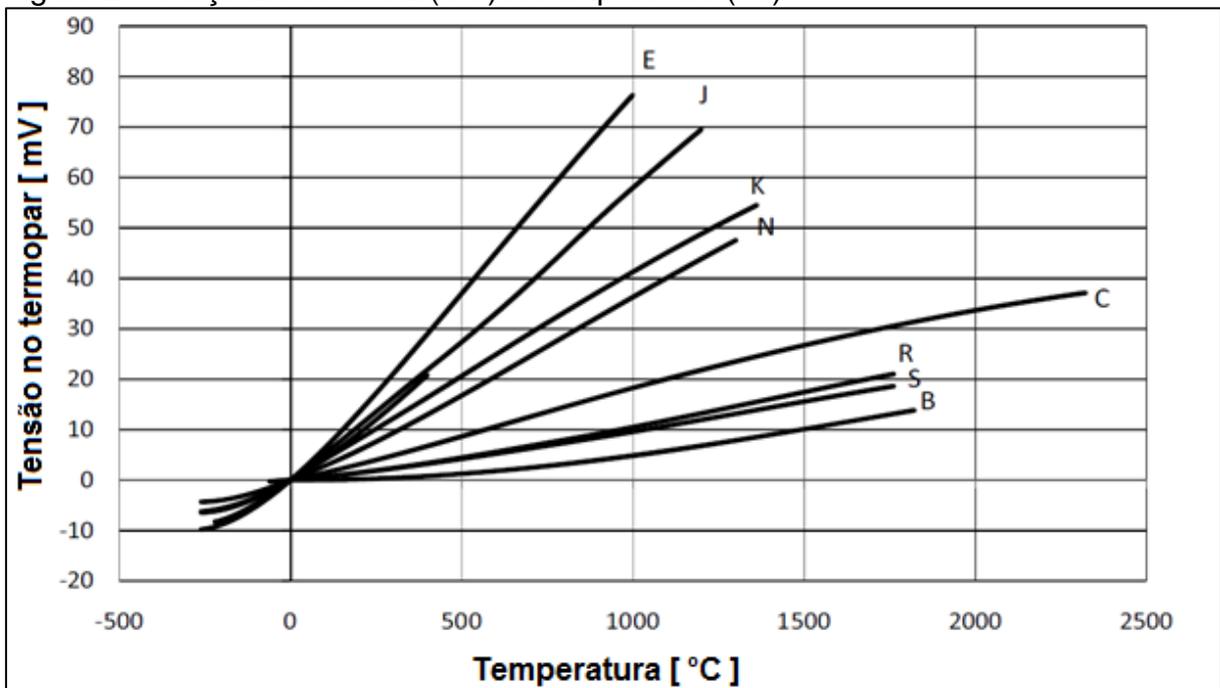
A instabilidade de valores em termopares em decorrer do seu uso não possuem um padrão, no qual dificulta estipular um intervalo de calibrações. Para Camarano (1993), a perda de precisão varia por diversos fatores específicos, como a temperatura em que é submetido o termopar, o tempo de exposição e até mesmo pelas partículas presentes no ambiente.

Uma forma de se manter um certo nível de confiabilidade é inserir um termopar já calibrado junto ao que está sendo utilizado, afim de medir sua diferença, estipulando o aumento dos desvios e assim criar um programa de controle para recalibração onde pode-se obter um sistema de substituição temporária dos sensores em utilização (EUROMET, 2011).

Conforme explica Ripple, Burns e Scroger (1994), a calibração do termopar de referência é usada para determinar a temperatura em cada ponto de medição, convertendo valores de F_{em} em valores de temperatura, tendo em vista seguir valores tabelados pelo ITS-90.

Como os valores de F_{em} são convertidos em temperatura, cada tipo de termopar possui seus respectivos valores de acordo com seu material, obtendo assim valores de F_{em} (mV) *versus* temperatura ($^{\circ}C$) mostrada pela Fig. 2, onde auxilia na obtenção de dados.

Figura 2 – Força Eletromotriz (mV) x Temperatura ($^{\circ}C$)



Fonte: Adaptado de Kerlin e Johnson, (2013, p.60)

Quanto aos erros e incertezas ocorridos com os sensores para determinar seu desvio e posteriormente corrigi-lo, é necessário levar em consideração seu erro sistemático, quantificá-lo e aplicar um fator de correção onde o mesmo pode ser minimizado. (ABNT, 2003 *apud* Manso,2013).

Para Gonçalves Júnior e Sousa (2008), o erro sistemático pode ser mensurado a partir de medições repetitivas em torno de um valor conhecido adotado como referência. Aplica-se a ela posteriormente a sua correção, que nada mais é que o inverso da tendência do mensurado.

$$Td = \bar{I} - VVC \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

Onde:

Td = Tendência;

\bar{I} = Média de um número finito de indicações (medições);

VCC = Valor verdadeiro convencional mensurado (estimativa).

$$C = -Td \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

Onde:

C = Correção.

Gonçalves Júnior e Sousa (2008), exaltam também sobre a correção de um valor definindo-a como uma constante aditiva, que quando somada à indicação do valor compensa o erro sistemático de um sistema de medição. A correção apresenta o mesmo valor em módulo da tendência, porém com sinal oposto.

Em todo processo de medição ocorre o erro aleatório que como explica Manso (2013), surge de variações nos valores conforme repetibilidade de medições, de forma imprevisível fazendo que não se possa compensá-lo.

De acordo com o IPAC (2015), ocorre dois modelos de incertezas, denominados como tipo A e tipo B. O tipo A busca analisar uma série de valores e calcular seu respectivo desvio-padrão enquanto o tipo B é dada por conhecimentos científicos, não estatístico, baseado em sua maioria em estimativas anteriores.

Seguindo o conceito de incerteza tipo A, Damasceno, Antônio e Oliveira (2008) exaltam que se faz necessário o uso das equações, partindo da média aritmética das medições, conhecendo sua variância e por fim chegando ao valor do desvio-padrão. As equações estão dispostas a seguir como:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_i \quad (3)$$

Onde:

\bar{X} = Média aritmética das medições realizadas;

n = Número de medições;

X_i = Valores das medições.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (4)$$

Onde:

s^2 = Variância das medições.

$$s(\bar{X}) = \left(\frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

$s(\bar{X})$ = Desvio padrão.

Para maior veracidade dos valores e correção dos mesmos, o termopar de referência necessita de uma documentação chamado de certificado de calibração, atestando o sensor como padronizado e dando-lhe condição ao uso. Para isso, o manual VIM (2012) menciona que tal certificado deve possuir valores de propriedades específicas, incertezas e rastreabilidades associadas ao sensor, onde é possível conhecer o nível de precisão que foi submetido.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos realizados neste trabalho serão dispostos a seguir na forma de tópicos, sendo estes: componentes do sistema de medição, calibração do sensor de referência, elaboração do sistema de medição e ajuste e procedimento para medições.

3.1 COMPONENTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição é composto por componentes nos quais são dependentes uns dos outros para o funcionamento correto durante sua execução. No trabalho foi proposto um sistema composto pelos seguintes componentes: Termopar tipo K, placa Arduino®, MAX6675® e *software* LabVIEW®.

3.1.1 Termopar tipo K

A escolha do sensor sendo um termopar tipo K se deu por ele possuir um custo acessível, aplicação ampla na indústria e possuir alta resolução, fundamental para ser utilizado como um sensor de referência.

A faixa de medição em que este tipo de sensor pode ser submetido ultrapassa os 1000 °C como citado anteriormente. Tendo em vista o seu uso no forno de indução da Faculdade SATC, o sensor se torna próprio para este trabalho.

3.1.2 Placa Arduino® Mega2560 e MAX6675®

A utilização da placa deve-se ao fato de que o módulo do termopar é incompatível com o LabVIEW®, sendo assim utilizou-se a mesma para gerar uma programação pelo *software* Arduino® para que assim os valores obtidos pelo termopar pudessem ser lidos através do complemento VISA® presente na biblioteca do LabVIEW®. Também foi utilizado o amplificador MAX6675® para que os sinais do termopar pudessem ser convertidos em uma tensão compatível com o Arduino e posteriormente lido pelo programa.

3.1.3 Software LABVIEW®

O programa funciona com uma interface ao usuário, trazendo um ambiente simples e intuitivo como um painel de dados, ao mesmo tempo é servido de uma programação funcional e prática. Nessa plataforma, o programa pode ser feito de forma que haja alterações caso necessário e ao mesmo tempo permitindo que o usuário tenha acesso ao programa como uma tela onde deve-se inserir os parâmetros desejados e o programa roda de forma limpa e eficiente.

3.2 CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE REFERÊNCIA

Para validação do sensor para ser utilizado como referência, é necessária sua calibração, bem como emissão do certificado onde são encontradas informações como a correção do sensor e pontos utilizados na medição.

3.2.1 Certificado de calibração

Para ser utilizado um sensor como referência, o sensor deve estar devidamente calibrado comprovando assim sua exatidão. O procedimento foi realizado pelo LAMETRO, que pertence ao Centro tecnológico da SATC (CTCL). Conforme mostrada na Fig. 3, foi emitido um certificado de calibração comprovando que o termopar está apto para ser utilizado como referência no sistema.

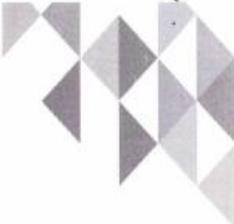
Figura 3 – Certificado de calibração do sensor de referência



SATC
EDUCAÇÃO, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

| 6420/19 |



1 | IDENTIFICAÇÃO: L. 6420/19
 Data de: 11/09/19
 1 | CL: TP-001
 Nome: Felix Borges
 Endereço: Alto Rio Maina, S/N.º - Alto Rio Maina - Sidertópolis - SC

2 | CONTRATANTE: Felix Borges

3 | OBJETO DA CALIBRAÇÃO: Data de Calibração: 11/09/2019 | Local da Calibração: LAMETRO
 Instrumento: Termopar | N.º Metroológico: TP - 001 | Modelo: Tipo K | N.º de Série: - | Fabricante: - | Faixa de Medição: -
 Faixa de Medição Calibrada: 25 °C a 1100 °C

4 | PADRÃO(ÕES) UTILIZADO(S):
 Instrumento 1: Calibrador Portátil Microprocessado | N.º Metroológico: CA - 001 | Certificado: ECIL 9076/18 CAL 0026 | Validade: 04/10/2020
 Instrumento 2: Termopar Tipo R | N.º Metroológico: TP - 005 | Certificado: ECIL 7542/18 CAL 0026 | Validade: 10/10/2020

5 | PROCEDIMENTO INTERNO DE CALIBRAÇÃO: PO 020, revisão 03
 Calibração realizada por comparação com termopar padrão em forno de calibração utilizando-se inserto para equilíbrio térmico, proporcionando estabilidade e uniformidade. Foram realizados no mínimo três ciclos de medição para cada ponto de calibração.

6 | CONDIÇÕES AMBIENTAIS DURANTE A CALIBRAÇÃO: Temperatura [20 +/- 2] °C | Umidade Relativa do Ar: [55 +/- 10] %

7 | RESULTADO: Unidade [°C]

[7.1] ESCALA DE TEMPERATURA

SMP	SMC	C	U	k	Veff
24,8	24,7	0,1	1,9	2,00	Infinito
362,3	358,3	3,8	1,9	2,00	Infinito
763,4	765,2	-1,8	1,9	2,00	Infinito
1084,1	1088,0	-3,9	1,9	2,00	Infinito

8 | OBSERVAÇÃO(ÕES):

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição, multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos [Veff] corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com o guia para a expressão da incerteza de medição 3ª edição - 2003. Os valores de k e Veff são apresentados no item "7. Resultado" deste certificado.
- Este certificado é válido exclusivamente para o objeto calibrado descrito nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros mesmo que similares. É permitida somente a cópia integral deste certificado.
- SMP - Sistema de Medição Padrão | SMC - Sistema de Medição a Calibrar | U - Incerteza de Medição [+/-].
- C - Correção. O valor da correção deverá ser sempre somado algebricamente à indicação.

Fonte: Do Autor (2019).

3.2.2 Parametrização do sensor

Tendo em mãos o sensor calibrado, sua curva de calibração e respectivo desvio padrão, foi feita a parametrização do mesmo conforme mostrada na Tab. 2, sendo possível corrigir seu erro sistemático dentro da própria programação do *software*, para que sua medição seja a mais exata possível.

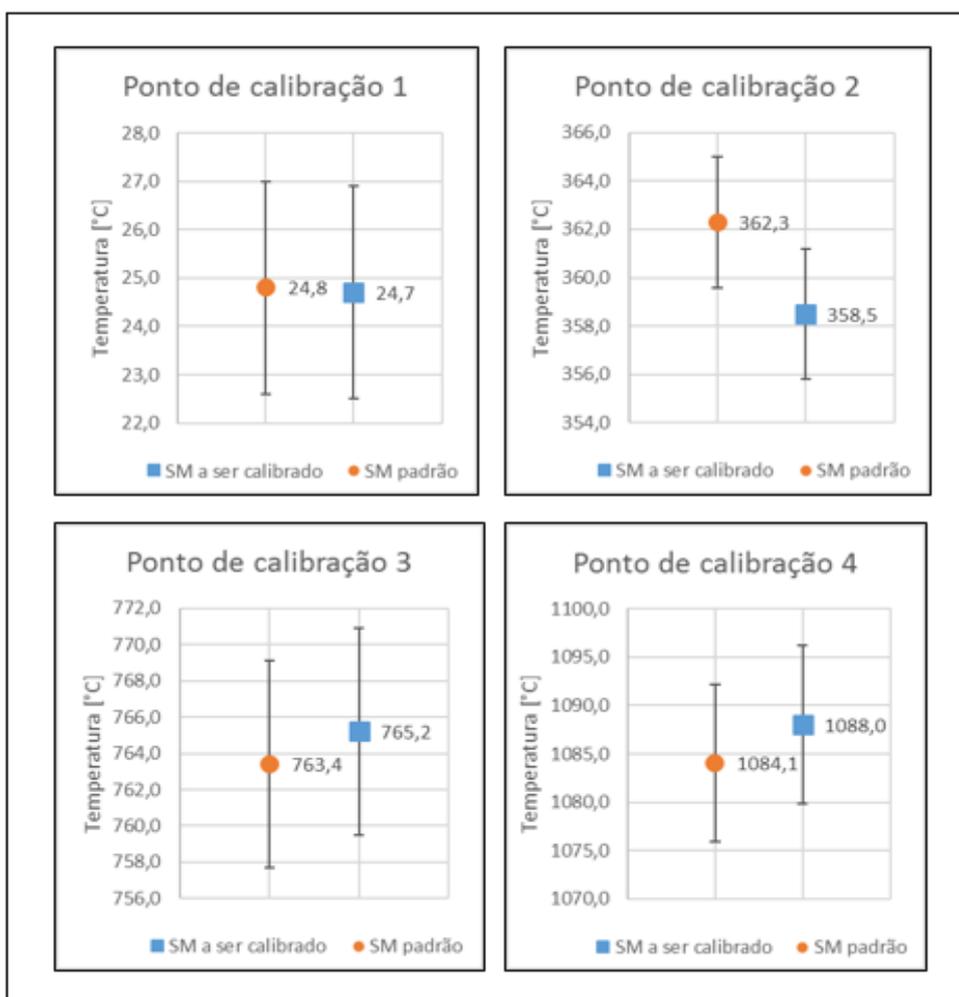
Tabela 2 - Medições para calibração do sensor de referência

ESCALA DE TEMPERATURA					
SMP [°C]	SMC [°C]	C [°C]	U [±°C]	k	Veff
24,8	24,7	0,1	1,9	2,00	Infinito
362,3	358,5	3,8	1,9	2,00	Infinito
763,4	765,2	-1,8	1,9	2,00	Infinito
1084,1	1088,0	-3,9	1,9	2,00	Infinito

Fonte: Do Autor (2019).

Considerando os pontos de medição realizados no procedimento de calibração mostrados na Tab.2, é apresentado na Fig. 4 que todos os valores obtidos pelo sistema de medição utilizado como padrão e o sistema de medição a ser calibrado são coerentes e não apresentam erros fora do esperado.

Figura 4 – Medições para o sensor de referência calibrado

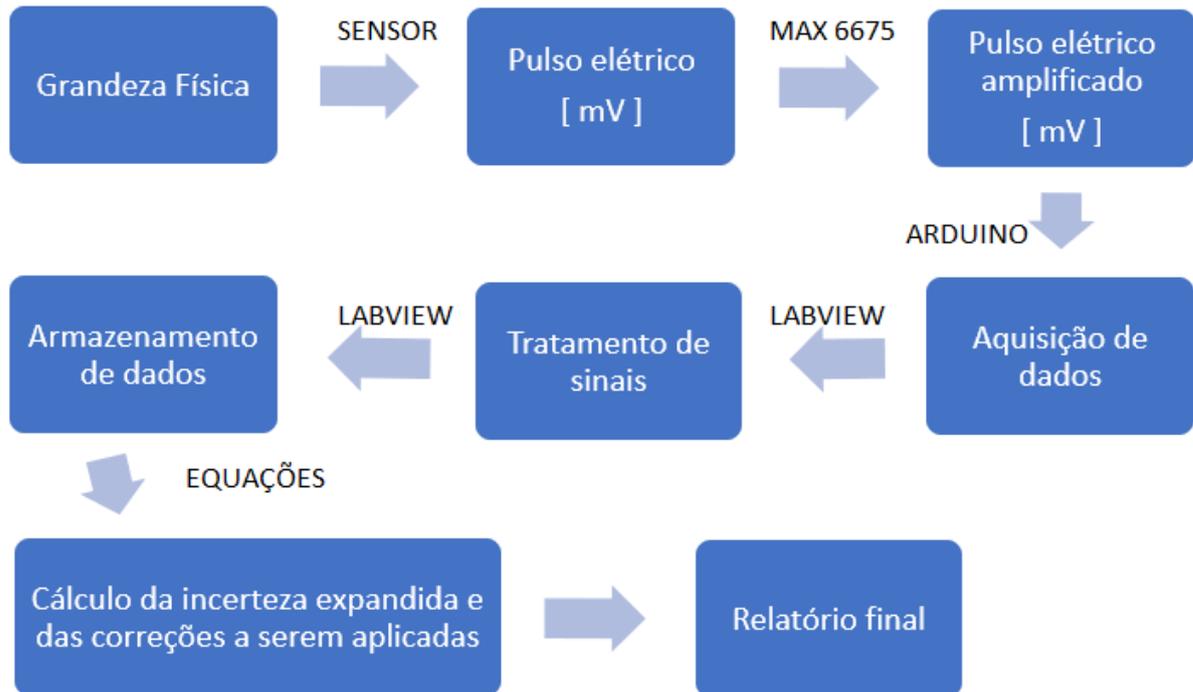


Fonte: Do Autor (2019).

3.3 ELABORAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para a criação do sistema, foi elaborado um diagrama onde pode-se compreender um pouco mais de como o sistema funciona. A Fig. 5 apresenta como acontecem os processos presentes do sistema de medição.

Figura 5 – Fluxograma para o sistema de medição



Fonte: Do Autor (2019).

O diagrama mostra os processos partindo da grandeza física, neste caso a temperatura, passando pelas etapas e componentes do sistema de medição, chegando até a etapa onde os valores das incertezas encontrados são utilizados na correção do sensor termopar.

3.3.1 Montagem da bancada de testes

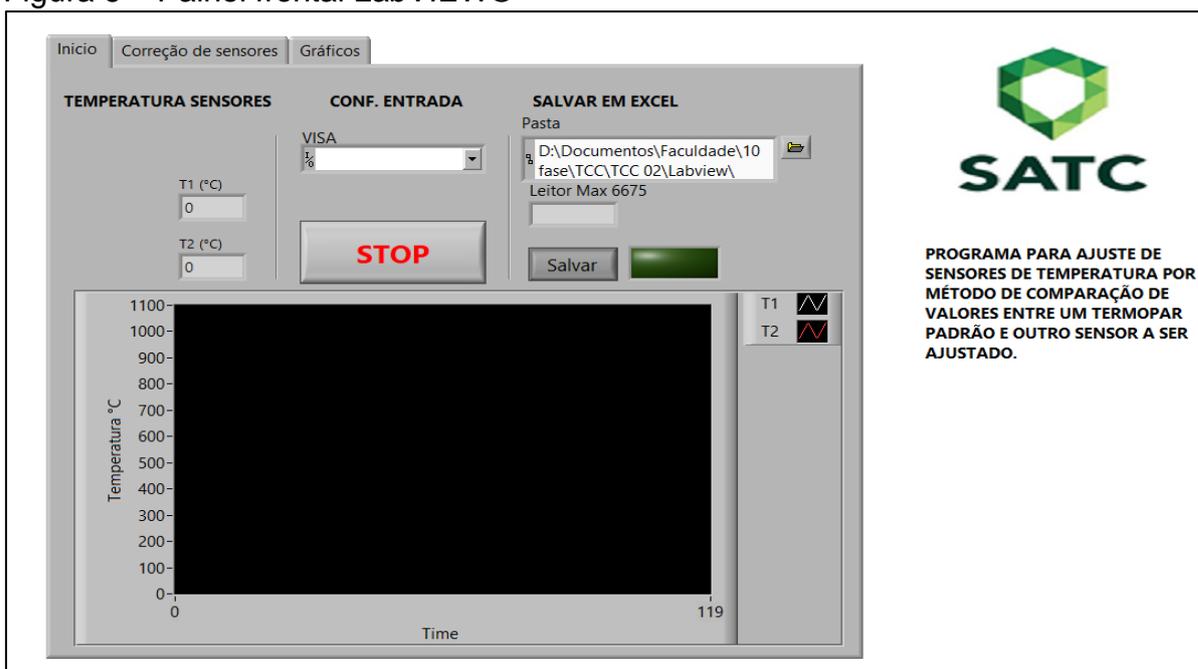
A montagem da bancada foi feita para realizar as medições dos sensores, onde possui a placa Arduino®, os amplificadores tipo MAX 6675®, a fonte regulada em 5 amperes e os fios para efetuar as ligações do sistema. Todo esse conjunto permite a medição de até 5 sensores em paralelo ao sensor de referência, sendo assim podendo ajustar mais sensores ao mesmo tempo.

Para maior eficiência das medições, neste trabalho foi sugerido a utilização de apenas dois sensores, o padrão e o sensor a ser ajustado pois assim a interferência de outros sensores é minimizada durante as medições e por se tratar de um processo relativamente rápido, não há necessidade de medir vários sensores simultaneamente.

3.3.2 Criação do programa

Com os componentes devidamente montados em uma bancada experimental, o programa a ser criado necessitava de que fosse possível ler dois sensores em paralelo e armazenar suas respectivas leituras bem como visualizá-las em uma interface do usuário conforme ilustra a Fig. 6.

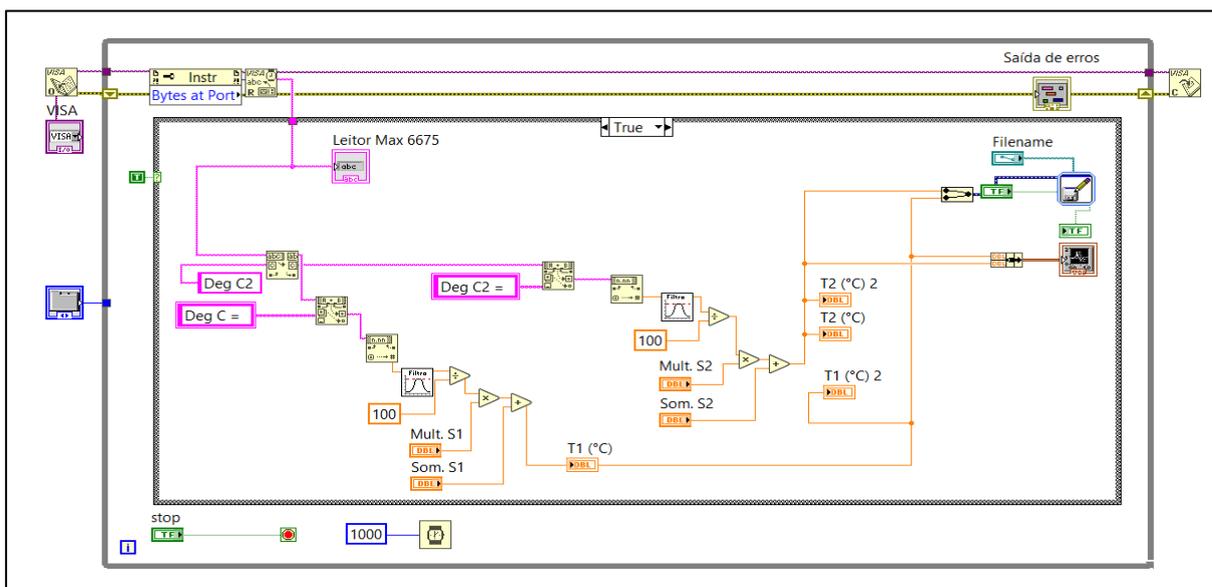
Figura 6 – Painel frontal LabVIEW®



Fonte: Do Autor (2019).

Na parte do diagrama de blocos, fica toda a programação utilizada para leitura dos sensores, calibração, armazenamento de dados. Para isso é necessário saber o que se precisa do programa e utilizar as extensões e comandos existentes no *software* para sua criação. Na Fig. 7 pode-se observar como ficou a estrutura do programa em si e a função dos blocos existentes.

Figura 7 – Estrutura do programa no diagrama de blocos



Fonte: Do Autor (2019).

Foi criada uma série de dados onde basicamente o sinal emitido pelo termopar é interpretado pela placa e transmitido para o LabVIEW® pela extensão VISA®. Após os valores serem convertidos em medidas de temperatura em °C, ainda é preciso adicionar o fator de correção do sensor de temperatura padrão conforme definido pela sua calibração. No diagrama de blocos, os componentes de soma e multiplicação são responsáveis por essa correção, onde são conhecidos a partir do desvio padrão do sensor já calibrado (S1). Para o sensor a ser calibrado (S2) existe também a opção de colocar os valores de ajuste para que após feitas as medições, possa se encontrar o seu respectivo desvio padrão, colocando os valores nesse campo e realizar a medição novamente assim comprovando que o erro é realmente o que foi encontrado.

3.4 DEFINIÇÃO DE CÁLCULO PARA INCERTEZA

Para a estimativa do valor do erro aleatório, utiliza-se a abordagem para uma medição direta com mais de uma fonte de incerteza envolvida na medição de um mensurando invariável.

As medições dos pontos analisados são realizadas em fornos com controle de temperatura, onde são consideradas as medições após a temperatura interna estabilizada, a abordagem selecionada é adequada.

O procedimento para estimativa da incerteza de medição deve-se seguir as seguintes etapas:

- Identificação e cálculo das incertezas-padrão de cada fonte de erro aleatório;
- Cálculo da incerteza combinada;
- Cálculo do número de graus de liberdade efetivo;
- Definição do t de SUDENE;
- Cálculo da incerteza combinada.

Há duas fontes de incerteza tipo A (incerteza da correção e desvio-padrão dos valores medidos – repetitividade) e uma do tipo B (resolução do sistema de medição). Elas podem ser calculadas através das equações abaixo.

$$u_{cor} = \frac{U_{cor}}{t} \quad (6)$$

Onde:

u_{cor} = incerteza-padrão da correção;

U_{cor} = incerteza expandida da correção;

t = t de Student.

$$\bar{u}_{rep} = \bar{u}_{rep} = \frac{u_{rep}}{\sqrt{n}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Onde:

\bar{u}_{rep} = incerteza-padrão da média das medições realizadas;

u_{rep} = incerteza-padrão das medições realizadas;

n = número de medições realizadas;

s = estimativa do desvio-padrão das medições realizadas.

$$u_{res} = \frac{(Resolução/2)}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Onde:

u_{res} = incerteza-padrão da resolução do sistema de medição.

A incerteza combinada das incertezas-padrão consideradas é calculada através da Eq. 9.

$$u_{comb} = \sqrt{(u_{cor})^2 + (\bar{u}_{rep})^2 + (u_{res})^2} \quad (9)$$

Onde:

u_{comb} = incerteza-padrão combinada.

O número de graus de liberdade efetivo é estimado através da Eq. 10.

$$\frac{[u_{comb}]^4}{v_{ef}} = \frac{(u_{cor})^4}{v_{cor}} + \frac{(\bar{u}_{rep})^4}{v_{rep}} + \frac{(u_{res})^4}{v_{res}} \quad (10)$$

Onde:

v = número de graus de liberdade para cada fonte de incerteza;

v_{ef} = número de graus de liberdade efetivo.

Com o número de graus de liberdade efetivo, pode-se definir o *t* de *Student* utilizado para calcular a incerteza expandida da medição.

A incerteza expandida é calculada através da Eq. 11.

$$U = t \cdot u_{comb} \quad (11)$$

Onde:

U = incerteza expandida.

Uma segunda forma de se atribuir uma incerteza de medição a um sistema de medição é considerar seu erro máximo. Por exemplo, para termopares tipo K, poderia ser considerado o valor máximo entre $\pm 2,2$ °C e 0,75% do valor lido. Trata-se de uma postura mais conservadora em que não se subestima o valor da incerteza da medição.

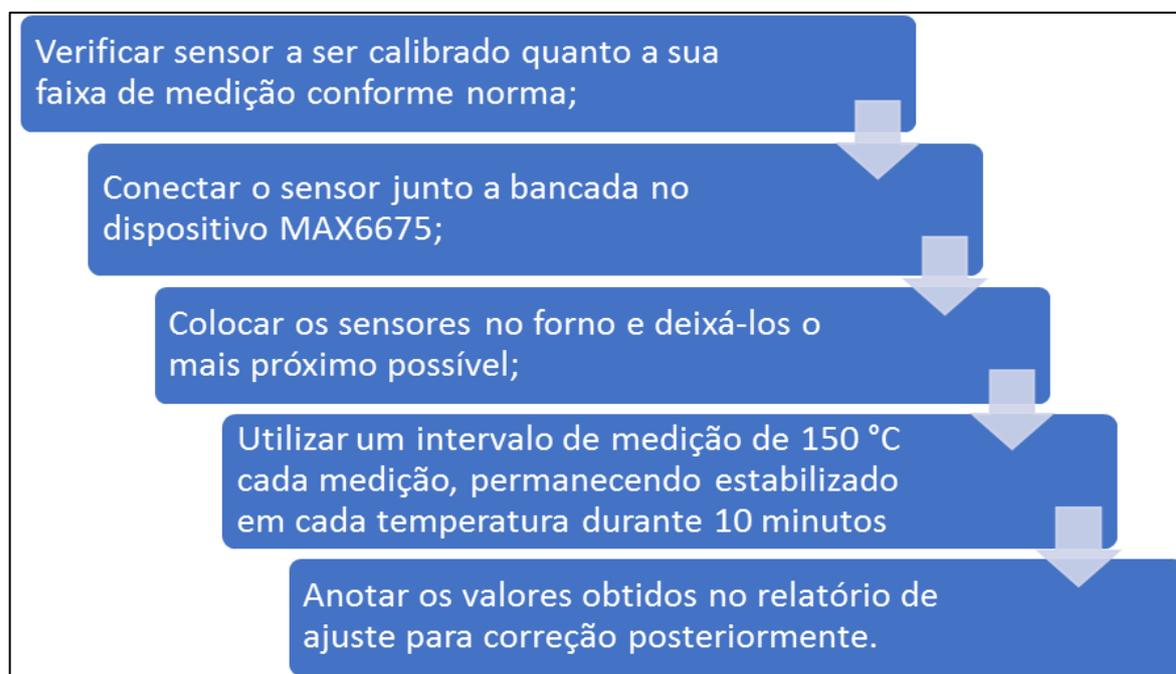
A incerteza expandida representa o valor do erro da medição, e deve ser indicado ao final da medição, juntamente com o valor médio das indicações obtidas pelo sistema de medição.

3.5 PROCEDIMENTO DE AJUSTE DOS SENSORES

Tendo em vista a necessidade de seguir um padrão para as medições, foi elaborado um procedimento de ajuste para guiar o usuário do sistema de medição a conseguir utilizar o programa e obter os dados necessários.

Como o processo de medição é constituído de etapas, o uso de um fluxograma inicial foi fundamental para que se pudesse realizar as medições de forma correta, conforme ilustra a Fig. 8.

Figura 8 - Fluxograma para o procedimento de ajuste



Fonte: Do Autor (2019).

Com uma sequência de etapas criada, por fim também foi elaborado um modelo de relatório de medições conforme mostrado da Tab. 3, onde pode-se colocar os resultados de cada medição na temperatura escolhida, assim posteriormente possibilitando encontrar os erros de medição, bem como desvio padrão de cada sensor.

Tabela 3 – Relatório de medição

RELATÓRIO PARA AJUSTE DE TEMPERATURA			
SENSOR PADRÃO(°C)	SENSOR PARA AJUSTE (°C)	AJUSTE (°C)	INCERTEZA DE AJUSTE

Fonte: Do Autor (2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

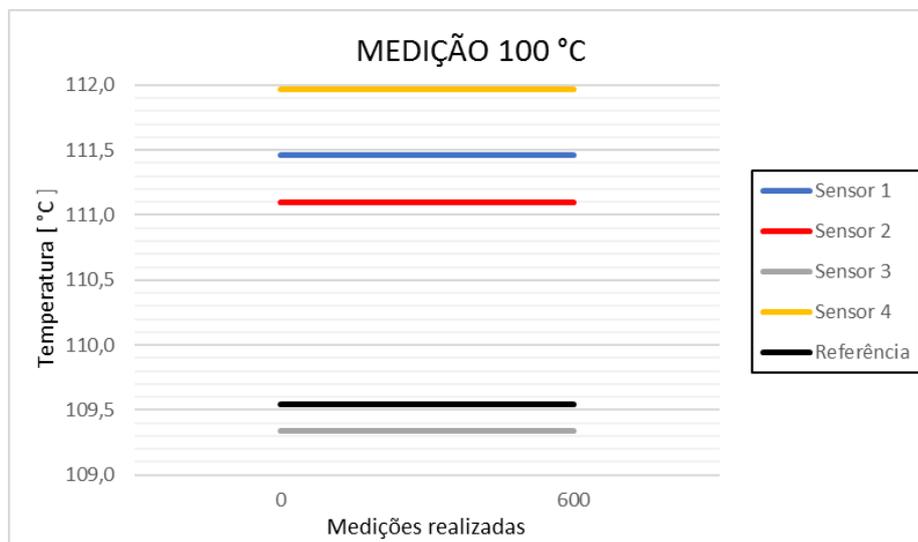
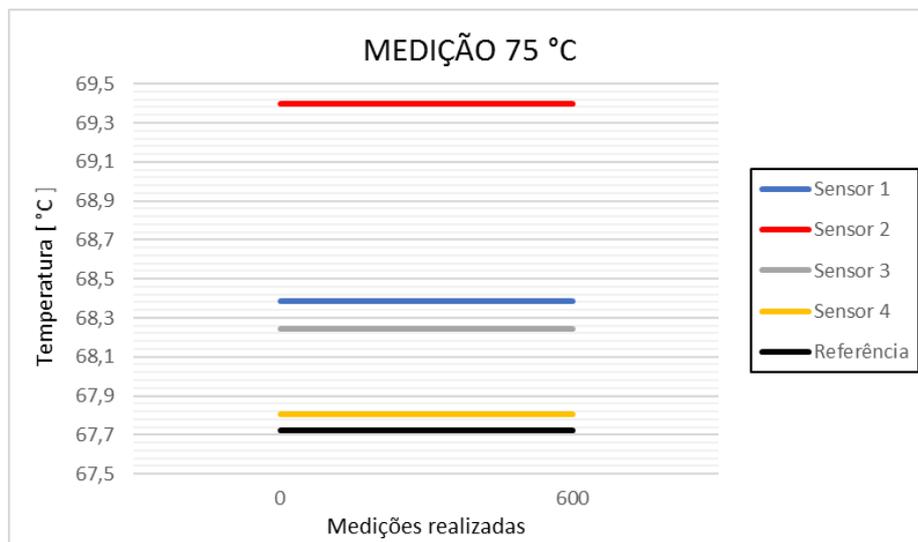
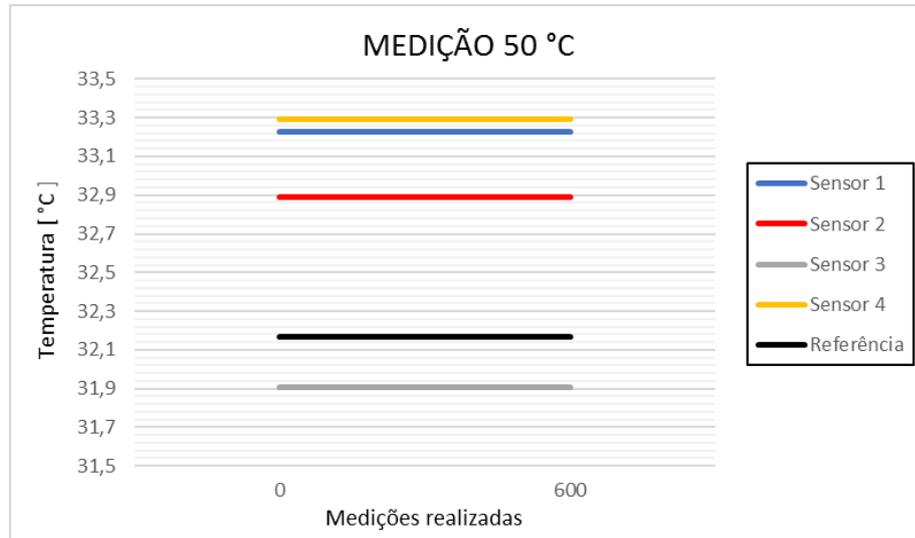
Os resultados obtidos serão apresentados de acordo com o que foi proposto no trabalho, sendo divididos na parte dos ensaios realizados com intervalo de medição menor e em baixas temperatura, intervalo maior e para todo a faixa de medição do sensor, construção do procedimento de ajuste e por fim o modelo de relatório para as próximas medições.

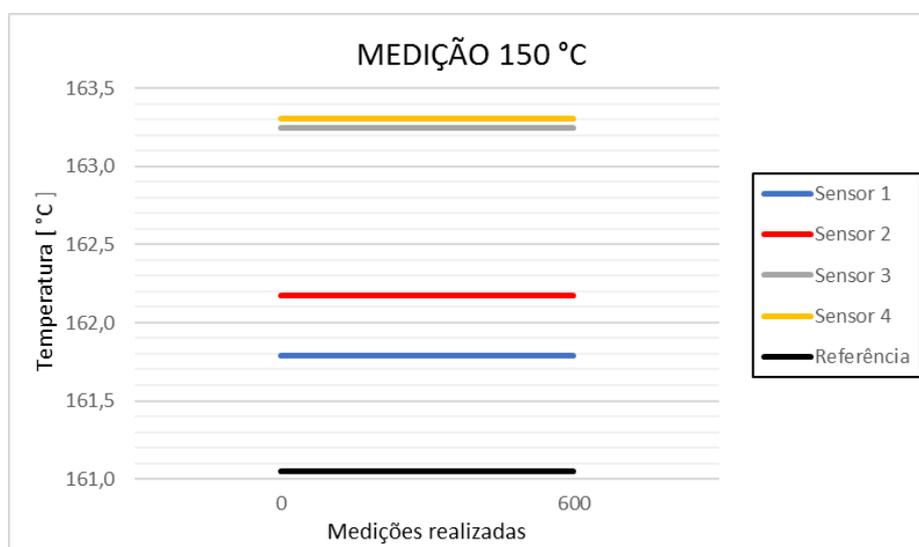
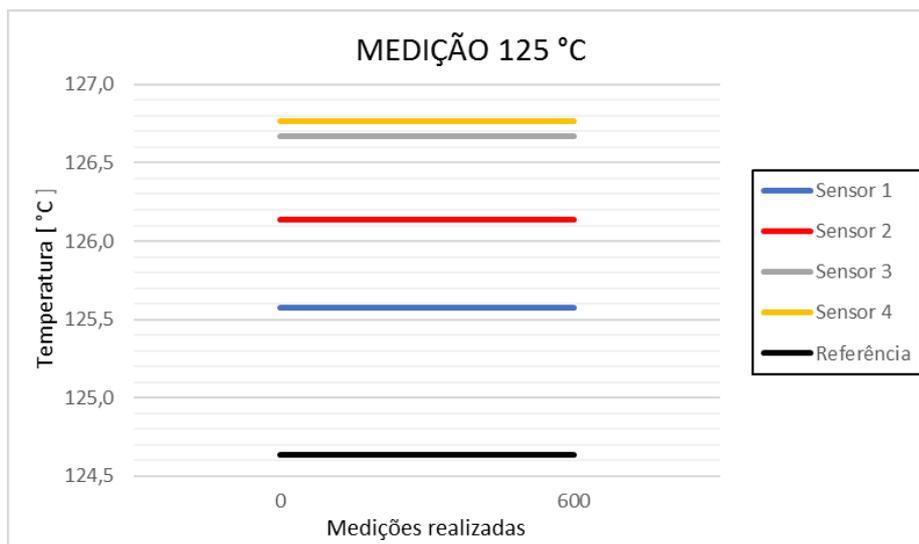
4.1 MEDIÇÃO EM BAIXA TEMPERATURA

Para uma análise inicial afim de testar o sistema, foram realizadas medições em um forno de resistência utilizando um intervalo de 25 °C cada ponto de temperatura, partindo de 50 °C até 150 °C. Para cada ponto foram armazenados 600 valores de medição após a temperatura do indicador do forno estabilizar.

A Fig. 9 mostra o comportamento de 4 sensores termopar tipo K fornecidos pela Faculdade SATC e o sensor termopar de referência. Para melhor entendimento foi retirado o valor médio das medições obtendo os seguintes resultados mostrados abaixo.

Figura 9 – Medições realizadas em baixa temperatura: a) 50°C, b) 75°C, c) 100°C, d) 125 °C e) 150°C





Fonte: Do Autor (2019).

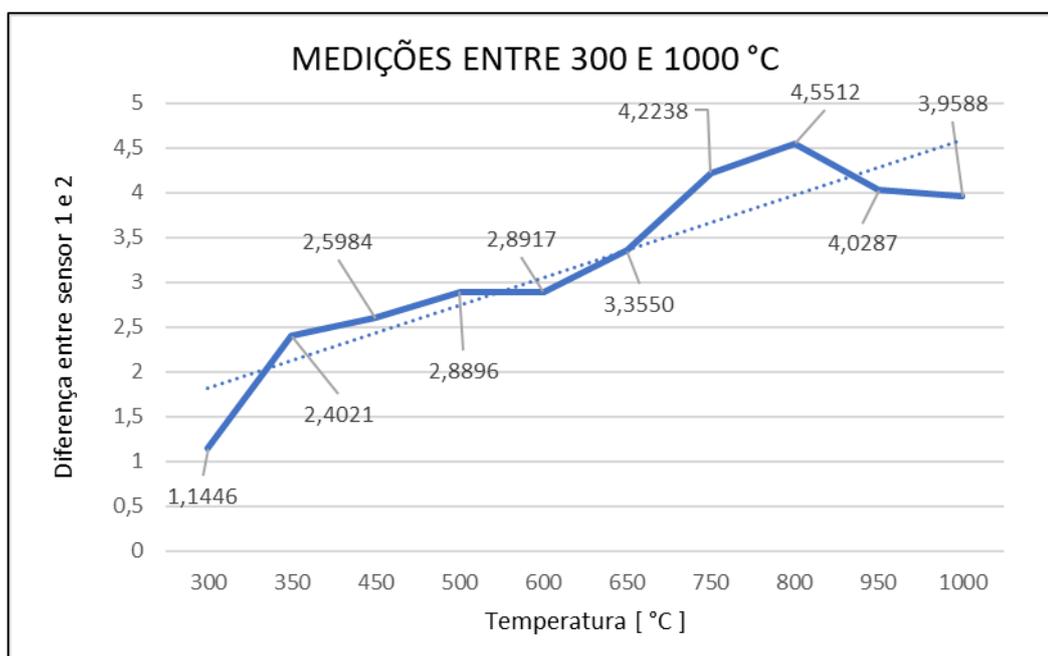
Conforme mostrado nas figuras acima, os valores obtidos em relação ao valor indicado pelo forno, divergem em todas as medições, algumas pelo fato que havia uma placa em frente ao sensor do próprio forno, fazendo que o calor chegasse mais aos sensores a serem medidos do que ao seu próprio sensor, e em outras medições sem essa placa, ocorreu o contrário, o calor atingiu primeiramente o sensor do equipamento, fazendo que o mesmo alcançasse primeiro a temperatura estabelecida. Com esses valores obtidos foi possível notar uma variação entre as temperaturas do sensor de referente em relação aos outros que também variam entre si, porém para poder se obter dados mais concisos verificou-se a necessidade de medir em toda a faixa de medição do sensor, com mais pontos de medição e mais tempo para cada ponto escolhido.

4.2 MEDIÇÃO EM TODA FAIXA DE MEDIÇÃO DO SENSOR

Afim de se obter valores com maior exatidão quanto as diferenças de temperatura dos sensores e assim poder encontrar os valores de incerteza de medição, foram realizadas novas medições, dessa vez em um forno de indução que poderia ser elevado até temperaturas acima de 1000 °C.

O método de análise das temperaturas encontradas se baseou no mesmo princípio das medições feitas em baixa temperatura, deixando a temperatura estabilizada durante 10 minutos, obtendo 600 medições para cada faixa escolhida. Desta vez foram utilizados apenas dois sensores, o sensor de referência e um outro para comparação, onde foram encontradas a correção para cada temperatura e elaborado um gráfico com a linha de tendência dos valores. O gráfico da Fig. 10 apresenta a diferença de temperatura entre o sensor padrão e o sensor a ser calibrado, sendo que a leitura presente no sensor calibrado mostrou sempre valores superiores ao outro.

Figura 10 – Medições realizadas em altas temperaturas



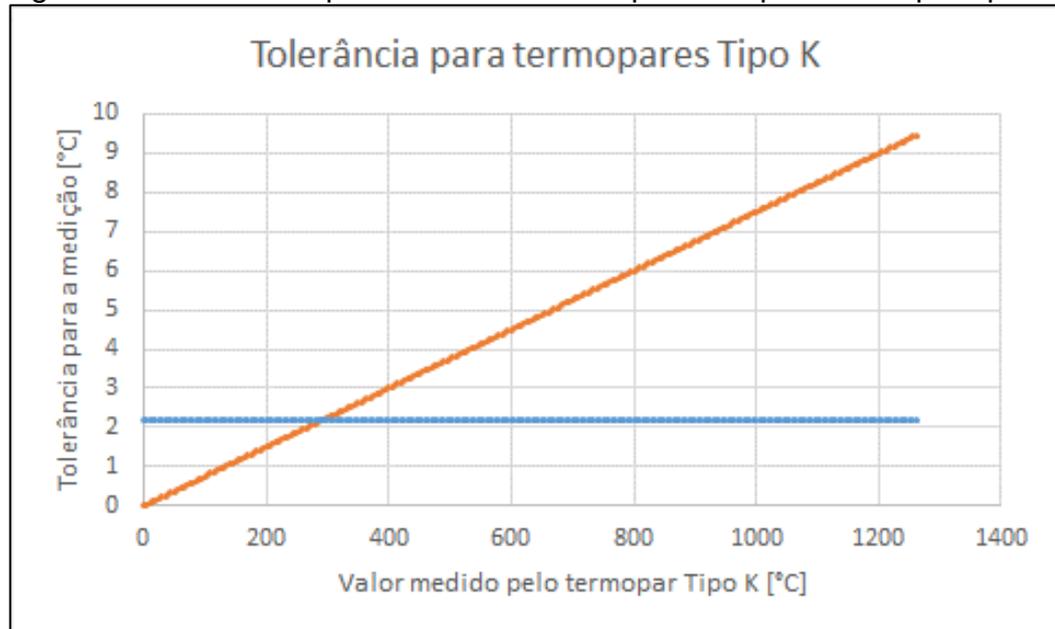
Fonte: Do Autor (2019).

Para o termopar tipo K o seu erro máximo é de $\pm 2,2$ °C ou $\pm 0,75$ % conforme descrita pela norma ASTM 230M, sendo assim por se tratar de dois

sensores tipo K, o seu erro combinado pode ser de até $\pm 4,4$ °C. Levando em consideração essa tolerância pode-se assumir que o sensor a ser calibrado está próximo de uma medição correta, porém para uma maior coerência também dos outros valores obtidos foram aplicadas a correção obtidas através da equação de incerteza de medição.

Sendo assim, pode-se assumir que para valores até 293 °C a tolerância é de $\pm 2,2$ °C, a partir de 294 °C, o valor da tolerância é de 0,75% do valor lido demonstrado também graficamente conforme Fig.11.

Figura 11– Tolerância padrão conforme temperatura para termopar tipo K



Fonte: Do Autor (2019).

4.3 VALORES DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Para efeito de cálculo, foram encontrados os valores de incerteza expandida para a temperatura de 300 °C como um exemplo, onde por meio da Eq. 5 até a Eq. 10 foram encontrados o valor de $\pm 1,9$ °C. Para essa temperatura a tolerância do próprio sensor é de $\pm 2,25$ °C respeitando o erro de 0,75% já mencionado, utilizando então este valor para ser conservador ao pior caso para o sistema em si.

4.4 PROCEDIMENTO DE AJUSTE

A criação de um procedimento de ajuste foi baseada em um fluxograma inicial onde se dá o passo-a-passo desde a escolha do sensor até o fim do processo. Para esse procedimento, foi elaborada uma sequência de etapas enumeradas onde esse procedimento foi adotado como padrão a ser seguido a cada vez que utilizar o sistema de medição.

Etapa 1 – Escolha do sensor a ser calibrado conhecendo sua faixa de medição, erros e incertezas presentes, conforme norma de sensores termopares (E230M);

Etapa 2 – Verificar se os dispositivos estão ligados e regulados corretamente, caso estando tudo certo, conectar os fios de ligação do sensor ao dispositivo MAX6675;

Etapa 3 – Colocar o sensor de referência no forno e em seguida colocar o sensor a ser ajustado o mais próximo possível, para se obter maior uniformidade e coerência das medições obtidas;

Etapa 4 – Utilizar um cálculo dividindo a faixa de medição do sensor por 10 para utilizar esse valor como intervalo ou utilizar um intervalo de no máximo 100 °C cada ponto de medição;

Etapa 5 – Permanecer ao menos 10 minutos com a temperatura constante no forno para estabilizar também os valores presentes nos sensores;

Etapa 6 – Anotar as temperaturas obtidas em um relatório próprio para isso onde se poderá definir o erro do sensor a ser ajustado e compensá-lo posteriormente;

Etapa 7 – Utilizar as equações de incerteza para definir o valor da incerteza do sensor e colocar o resultado no relatório de ajuste anexo a esse procedimento.

4.3 MODELO INTERNO PARA RELATÓRIO DE AJUSTE

Conforme proposto neste trabalho, para poder utilizar os dados das medições de forma física, foi elaborado um modelo de relatórios onde poderia se anotar os valores de temperatura do sensor de referência e o sensor a ser calibrado, o ajuste do mesmo e sua incerteza como mostra a Fig. 12. A última coluna é determinada a partir da incerteza de medição que está presente no procedimento de ajuste.

5. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho pode-se destacar que o ajuste de sensores depende de vários fatores, como o ambiente ao qual são feitas as medições, o sistema de medição em si devido aos seus componentes, bem como o método e equações.

O *software* LabVIEW® se mostrou como uma ferramenta muito eficiente, trazendo resultados instantâneos, podendo os armazenar para outras finalidades, assim como por sua interface simples, o que auxilia qualquer pessoa até mesmo leiga a realizar as leituras das medições.

O uso de um procedimento para realização de medições e posteriormente anotar os valores em um relatório próprio para os ajustes serem feitos, tornou o processo mais simples e intuitivo, possibilitando que seja tanto de uso didático quanto profissional.

A calibração do sensor utilizado como referência foi feito em poucos pontos de sua faixa de medição, sendo assim não foi possível se obter valores com alta precisão. Calibrar o sensor novamente em ao menos 10 pontos de temperatura e juntamente a ele calibrar um indicador de temperatura, para que o conjunto seja montado e sua visualização seja feita de modo mais visual, sem tanta dependência do LabVIEW®.

Como sugestão para trabalhos futuros, utilizar uma placa de aquisição de dados da National Instruments, possibilitando que o processo de ajuste do sensor seja feito diretamente no *software*, além de promover mais confiabilidade no sistema em si quando aos valores de temperatura obtidos.

Foi realizado o orçamento e encaminhado o procedimento de aquisição de um módulo para medição de temperatura da *National Instruments* (modelo USB-TC01). Os equipamentos da fabricante apresentam maior robustez e apresenta resultados mais confiáveis do que os obtidos com os *hardwares* disponíveis para utilização com Arduino. Além disso, trará mais agilidade e facilidade nos procedimentos de ajustes que serão realizados na instituição.

O processo de calibração do sensor de referência deve ser refeito, porém dessa vez deve-se calibrar o conjunto do sistema de medição formado pelo termopar tipo K e o novo *hardware* (USB-TC01). Além disso, deve-se utilizar mais pontos de

calibração ao longo da faixa de medição do termopar tipo K. Ficou evidente que com apenas 4 pontos de medição não se tem uma clara percepção do comportamento do sistema ao longo de toda a faixa de medição.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Me. Luan de Campos Corrêa pela orientação, e incentivo durante a realização deste trabalho. Agradeço também à minha família e amigos pelo apoio e motivação.

6. BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 13370, “Termopar – Calibração por comparação com instrumento-padrão”. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ABNT NBR 14610, “Indicador de temperatura com sensor – Calibração por comparação com instrumento-padrão”. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

ASTM E220, “Standard Test Method for Calibration of Thermocouples by Comparison Techniques”. West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM E230/E230M, “Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples”. West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM E2623, “Standard Practice for Reporting Thermometer Calibrations”. West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM E2730, “Standard Practice for Calibration and Use of Thermocouple Reference Junction Probes in Evaluation of Electronic Reference Junction Compensation Circuits¹”. West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM International. “Manual on the use of thermocouples in temperature measurement” 4th edition, 1993, USA, 290p.

Camarano, D. M., 1993, “Procedimentos aplicáveis à garantia da qualidade metrológica dos resultados em termometria automatizada com termopar e sensores resistivos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, 129 p.

EURAMET – Calibration of Thermocouple. Disponível em: https://www.euramet.org/Media/docs/Publications/calguides/EURAMET_cg-8_v.2.1_Calibration_of_Thermocouples.pdf. Acesso em 25 de setembro de 2018.

Filho, B. S. A., 1999, “Projeções do desvio de calibração e estudo da confiabilidade de termopares”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas/SP, Brasil, 120 p.

Gesteira, L. G. G. K., 2014, “Sistema de aquisição de dados baseado em LabVIEW para um dinamômetro de chassi”, Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, Brasil, 83 p.

Gonçalves Junior, A. A., Sousa A. R. de., “Fundamentos de metrologia científica e industrial”, Editora Manole, 2008, 407p.

Grando, F. L., 2013, “Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em ambiente LabVIEW para aquecedores solares”, Monografia de Graduação, Universidade Federal Tecnológica do Paraná – UFTPR, Pato Branco/PR, Brasil, 74 p.

IPAC, “Avaliação da incerteza de medição em calibração”. Disponível em: <http://www.ipac.pt/docs/publicdocs/requisitos/OGC010.pdf>. Acesso em: 03 de Outubro de 2018.

Kerlin, T. W., Johnson, M., “Practical Thermocouple Thermometry – Instrument Society of America”, second edition, 1999, 175p.

Kirianaki, N. V., *et al.* “Data acquisition and signal processing for smart sensors”. New York, Estados Unidos, 2002, 275p.

Manso, G. F. A., 2013, “Estudo da determinação da incerteza de medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura”, Projeto de graduação, Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil, 90 p.

NATIONAL INSTRUMENTS. What Is Data Acquisition? National Instruments. Disponível em: <http://www.ni.com/data-acquisition>. Acesso em: 10 de setembro de 2018.

Pinto, C. S., Degastei, F. T. “Desenvolvimento de uma interface para aquisição de dados experimentais utilizando o microcontrolador Arduino UNO” Workshop de pós-graduação e pesquisa do centro Paula Souza, 2015. Acesso em 20 de setembro de 2019.

Ripple, D., Burns, G. W., Scroger, M. G., “Assessment of uncertainties of thermocouple calibrations at NIST”, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 1994, 34p.

Silva, J. L. da., 2008, “Implementação de um Sistema de Controle para um Banco de Ensaio em Motores de Combustão Interna”, Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil, 50p.

VIM – Vocabulário internacional de metrologia “Conceitos fundamentais e gerais e termos associados”, INMETRO, 1ª edição Luso-brasileira, Duque de Caxias, RJ, 2012, 94p.