

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Sistema de calibração de sensores de temperatura
baseados em redes de Bragg em fibra óptica**

Ricardo Jorge Rebelo Vidal

Dissertação realizado no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Telecomunicações

Orientador: Professor Doutor Henrique Manuel de Castro Faria Salgado (FEUP)
Co-orientador: Doutor Francisco Manuel Moita Araújo (INESC Porto)

Junho 2009

© Ricardo Jorge Rebelo Vidal, 2009

Resumo

Os sensores de Bragg em fibra óptica têm actualmente um elevado potencial de desenvolvimento de sistemas avançados de monitorização em inúmeras aplicações industriais. Em particular a imunidade a interferências electromagnéticas torna possível a implementação de sistemas de mapeamento térmico em grandes máquinas eléctricas - i.e., geradores, transformadores de potência, fontes de alta tensão, etc. -. Estas aplicações são caracterizadas pela elevada exigência de desempenho dos sensores envolvidos na implementação dos sistemas de monitorização, pois os elevados custos associados à perda, mesmo que temporária, da funcionalidade destas infra-estruturas impõe os mais elevados padrões de operacionalidade da indústria. A produção de sensores de temperatura em fibra óptica enfrenta assim uma elevada exigência técnica em termos de processos de calibração e certificação indispensáveis à garantia de operação a longo prazo. A ideia associada ao presente trabalho passa pela necessidade de desenvolvimento de equipamentos e procedimentos para a calibração automática de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg em fibra óptica. Este sistema é essencial para garantir não só os elevados padrões de qualidade, mas também as exigências de redução de custos sem penalização da fiabilidade a longo prazo.

O plano de trabalho tem por base um estudo sistemático dos sistemas e procedimentos de calibração dos sensores convencionais eléctricos. Foi implementado um sistema com capacidade para calibrar sensores de Bragg em correlação com um padrão secundário de temperatura. Este sistema é controlado por um software desenvolvido no âmbito deste trabalho que permite a aquisição, determinação e registo em base de dados dos parâmetros de calibração dos sensores de temperatura. O desempenho do sistema implementado foi avaliado em ambiente produtivo na calibração de uma população com relevância estatística de sensores de temperatura. O trabalho foi concluído com a análise estatística dos resultados obtidos que permitirá sistematizar os procedimentos de calibração dos sensores de temperatura baseados em redes de Bragg em fibra óptica.

Abstract

Fiber Bragg grating sensors have currently a high potential for development of advanced monitoring systems in many industrial applications. In particular, immunity to electromagnetic interference renders possible the implementation of systems for thermal mapping of large electrical machines – for instance, large scale generators, power transformers, high voltage sources, etc. -. These applications are extremely demanding in terms of reliability and performance of the sensors integrated in the implementation of the monitoring systems, since the high costs associated with the failure, even if temporary, of functionality of such infrastructures requires the highest standards of operationally of the industry. The production of temperature sensors based on fiber optic technology thus faces high technical requirements in terms of calibration and certification processes necessary to ensure the long-term operation. The idea behind to the presented work is related the need for development of equipment and procedures for automatic calibration of fiber Bragg grating temperature sensors. These systems are essential to ensure not only the high quality standards, but also the demands for cost reduction without sacrificing the long-term reliability.

The work plan was based on a systematic study of the systems and procedures for calibration of conventional electrical sensors. A system able to calibrate fiber Bragg grating temperature sensors in correlation with a secondary standard temperature probe was implemented. This system is controlled by software develop in the framework of the current work that enables the acquisition, establishment and registration in a database of the calibration parameters of the temperature sensors. The performance of the implemented system was evaluated in productive environment for the systematic calibration of a population of temperature sensors with statistical significance. The work will be completed with the statistical analysis of results that will systematize the procedures for calibration of fiber Bragg grating temperature sensors.

Agradecimentos

Os diversos trabalhos apresentados nesta dissertação foram realizados na empresa FiberSensing, Sistemas Avançados de Monitorização, S.A., sob a alçada e coordenação científica do INESC Porto, nomeadamente, pelo Prof. Doutor Henrique Manuel de Castro Faria Salgado e o Doutor Francisco Manuel Moita Araújo, a quem gostaria de remeter os meus verdadeiros agradecimentos pelo suporte dado, pela ajuda prestada, pela melhor orientação técnica a seguir nas diversas etapas ao longo do trabalho e principalmente pela confiança depositada em mim.

Os meus agradecimentos, ao meu colega Daniel, pelo incentivo dado para a realização deste trabalho.

Gostaria de expressar a minha alegria pela possibilidade de trabalhar com a fantástica equipa da FiberSensing, que me possibilitou ajuda e assistência às necessidades que foram surgindo e especial apreço aos colegas Pedro Arménio e Tiago Poseiro, pela flexibilidade e ajuda recebida durante os ensaios e testes realizados, assim como aos seguintes colegas, pela ajuda prestada na definição e escolha da melhor estratégia a seguir: o Eng. Filipe Pinto na área de electrónica, a Eng. Marta Girão na área do desenho mecânico, o Eng. Alberto Maia na área de implementação em produção, à Eng. Cristina Barbosa pela ajuda de âmbito diverso e o Eng. Luís Meneres na área de Metrologia.

Por fim, e não menos importante, gostaria de expressar os meus agradecimentos, pela ajuda, flexibilidade e apoio prestado, à minha esposa Patrícia e à minha filhota, a Ritinha.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiv
Abreviaturas e Símbolos	xvi
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Estrutura da dissertação.....	2
1.2 - Sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg.....	3
1.3 - Sensor de temperatura baseado em redes de Bragg: conceito	4
Capítulo 2	7
Métodos/sistemas de calibração de sensores convencionais de temperatura.....	7
2.1 - Introdução	7
2.2 - Sensores eléctricos	8
2.3 - Sensores ópticos e sensores convencionais: considerações.....	10
2.4 - Estado de arte: métodos e procedimentos de calibração	10
2.5 - Estado de arte: sistemas de calibração	14
Capítulo 3	16
Desenvolvimento e implementação de sistema de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg em fibra óptica.....	16
3.1 - Descrição do processo: fabricação e calibração com validação.....	17
3.2 - Sistema de calibração de sensores de temperatura	20
3.3 - Sistema de calibração FSBlockCalibrator.....	48
Capítulo 4	68
Análise estatística dos resultados	68
4.1 - Introdução	68
4.2 - Controlo estatístico do processo de caracterização dos sensores de temperatura	71

Capítulo 5	79
Conclusão e desenvolvimentos futuros.....	79
Referências	81
Anexos.....	82

Lista de figuras

Figura 1.1 - Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra óptica.	3
Figura 1.2 - Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura.	5
Figura 2.1 - Exemplo de Detector de Temperatura por Resistência.	8
Figura 2.2 - Exemplo de Termopar.	9
Figura 2.3 - Exemplo de Termistor.	9
Figura 2.4 - Exemplo de sensor temperatura em Circuito Integrado.	10
Figura 2.5 - Calibrador baseado em banho (<i>Bath Calibrator</i>).	14
Figura 2.6 - Calibrador baseado em bloco seco (<i>Dry Block Calibrator</i>).	14
Figura 2.7 - Calibrador para comparação em pontos fixos.	15
Figura 3.1 - Diagrama do processo produtivo de sensores de temperatura baseados em redes Bragg.	17
Figura 3.2 - Encapsulamentos típicos de sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg.	18
Figura 3.3 - Pormenor dos diversos blocos internos consoante o tamanho desejado do sensor a calibrar.	20
Figura 3.4 - Pormenor do bloco interior usado no calibrador Ametek.	21
Figura 3.5 - Câmara de ciclos térmicos Binder.	22
Figura 3.6 - Interrogador optoelectrónico BraggMETER FS4200.	23
Figura 3.7 - Sensor padrão secundário de temperatura <i>PRT</i> (5608) e <i>medidor digital</i> (1502A).	24
Figura 3.8 - Distribuição dos sensores de temperatura por canal óptico.	26
Figura 3.9 - Posicionamento dos sensores de temperatura a calibrar no interior da câmara de ciclos térmicos.	27
Figura 3.10 - Posicionamento do sensor padrão secundário de temperatura (5608) na câmara de ciclos térmicos e subestrutura para uniformizar a temperatura.	27
Figura 3.11 - Perfil de temperatura para a calibração de sensores baseados em redes Bragg.	29

Figura 3.12 – Resposta dos sensores de temperatura ao perfil de temperatura submetido.	31
Figura 3.13 – Perfil do padrão de temperatura submetido para validação qualidade QuV.	32
Figura 3.14 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura.	34
Figura 3.15 – <i>Folha de Calibração</i> de sensor de temperatura baseado em redes de Bragg.	42
Figura 3.16 – Tipos de distribuição de probabilidades: rectangular, triangular e normal.	45
Figura 3.17 – Distribuição <i>t-student</i>	47
Figura 3.18 – Elemento protótipo: Peltier RC12-8L.	49
Figura 3.19 – Desenho do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº 1.	50
Figura 3.20 – Fotografia do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº 1.	51
Figura 3.21 – Detalhe cilindro interno do sistema calibração FSBlockCalibrator protótipo nº1.	51
Figura 3.22 – Montagem ensaio 1: protótipo 1 do FSBlockCalibrator.	53
Figura 3.23 – Ensaio na aferição da temperatura mínima: protótipo nº1 do FSBlockCalibrator.	54
Figura 3.24 – Ensaio na aferição da temperatura máxima: protótipo nº1 do FSBlockCalibrator.	54
Figura 3.25 – Gráfico de temperatura (°C) do ensaio 1.	55
Figura 3.26 – Montagem do ensaio 2.	56
Figura 3.27 – Gráfico de temperatura (°C) ensaio 2.	57
Figura 3.28 – Detalhe de montagem da cascata de dois elementos Peltier do ensaio 3.	58
Figura 3.29 – Gráfico temperatura (°C) ensaio 3.	59
Figura 3.30 – Montagem ensaio 4: elemento Peltier com isolador de protecção térmica bloco alumínio.	61
Figura 3.31 – Gráfico temperatura (°C) ensaio 4.	62
Figura 3.32 – Montagem ensaio 5: dois elementos Peltier com isolador para protecção térmica bloco alumínio e ventilador adicional.	63
Figura 3.33 – Gráfico temperatura (°C) ensaio 5.	64
Figura 3.34 – Desenho base para sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº 2.	66
Figura 3.35 – Diagrama funcional do sistema de calibração FSBlockCalibrator.	67
Figura 4.1 – Gráfico de curva de distribuição normal.	69
Figura 4.2 – Código em LabVIEW da aplicação “SSAnalysis.exe” para o cálculo grandezas estatísticas.	72
Figura 4.3 – Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro S2. ...	73
Figura 4.4 – Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro S1. ...	74

Figura 4.5 - Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro S0.	75
Figura 4.6 - Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro Erro Máximo FOS.	76
Figura 4.7 - Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro histereses.	77
Figura 5.1 - Diagrama bloco contemplando comunicação via protocolo série RS232 com o equipamento de medição digital (1502A).	83
Figura 5.2 - Interface gráfico aplicação ThermoMETERReadout.exe - tab Init.	84
Figura 5.3 - Interface gráfico aplicação ThermoMETERReadout.exe - tab Readings.	85
Figura 5.4 - Interface gráfico aplicação ThermoMETERReadout.exe - tab Serial Configuration.	86
Figura 5.5 - Aplicação de calibração de sensores de temperatura baseados em redes Bragg.	87
Figura 5.6 - Aplicação Tab para inserir dados de entrada dos sensores a caracterizar.	88
Figura 5.7 - Tab para definição dos valores reais médios dos patamares do padrão de temperatura.	89
Figura 5.8 - Tab para análise e selecção dos patamares da resposta dos sensores temperatura.	90
Figura 5.9 - <i>Folha de Calibração</i> de sensor de temperatura baseado em redes de Bragg.	91
Figura 5.10 - Campos da tabela TSCalibrationResults” da base dados “Producao” no servidor.	92
Figura 5.11 - Tab Reporting - parâmetros importantes da calibração, para a visualização e validação da operação, por parte do utilizador.	93
Figura 5.12 - Tab para inserir dados de entrada dos sensores a caracterizar - QuV.	94
Figura 5.13 - Tab para definição dos valores reais médios dos patamares padrão de temperatura no QuV.	95
Figura 5.14 - Tab para análise e selecção dos patamares da resposta dos sensores temperatura QuV.	96
Figura 5.15 - Brochura do sistema de calibração Ametek, série JOFRA, modelo ATC155.	99
Figura 5.16 - Algoritmo para detecção automática de estabilidade num patamar de dados.	100
Figura 5.17 - Apresentação de resultado de teste feito ao algoritmo.	100

Lista de tabelas

Tabela 2.1 — Pontos fixos de temperatura e pressão, referente à solidificação, ebulição e pontos triplos de substâncias puras (ITS-90)	13
Tabela 3.1 — Principais especificações técnicas da câmara MKF240.....	22
Tabela 3.2 — Principais especificações técnicas do interrogador FS4200.....	23
Tabela 3.3 — Principais especificações técnicas do sensor padrão de temperatura <i>PRT</i>	24
Tabela 3.4 — Principais especificações técnicas do <i>medidor digital</i>.....	25
Tabela 3.5 — Formato dos dados gerados pelo equipamento BraggMETER FS4200	28
Tabela 3.6 — Formato dos dados gerados pelo <i>medidor digital</i>.....	29
Tabela 3.7 — Dados gerados da submissão dos sensores temperatura ao perfil de temperatura de doze horas (-20°C a + 80°C).....	35
Tabela 3.8 — Dados transformados para comprimento de onda absoluto	37
Tabela 3.9 — Aproximação polinomial de segunda ordem aos dados em comprimento de onda absoluto e resultado para uma temperatura de referência de 30.0°C	37
Tabela 3.10 — Cálculo para transformação em variação de comprimento de onda referenciado ao comprimento de onda medido a 30.0°C	38
Tabela 3.11 — Aproximação polinomial de 2ª ordem	38
Tabela 3.12 — Cálculo do erro FOS	39
Tabela 3.13 — Calculo aproximação segunda ordem patamares ascendentes e descendentes ...	40
Tabela 3.14 — Calculo aproximação	41
Tabela 3.15 — Valores validação sensor temperatura	43
Tabela 3.16 — Valores validação sensor temperatura	49
Tabela 5.1 — Lista de dados obtidos experimentalmente provenientes do ensaio 1 do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº1	97

Tabela 5.2 — Cálculos para a determinação da incerteza expandida associada à calibração sensores temperatura baseados em redes de Bragg	98
--	-----------

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CPU	Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
EAL	European Association of Legislation
f.e.m.	Força Electromotriz
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
INESC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores
PWM	Pulse-width Modulation
RS232	Recommended Standard 232
txt	Textfile
VI	Virtual Instrument
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

Lista de símbolos

CWL	Comprimento de onda central
WL	Comprimento de onda
Ω	Ohm
°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahrenheit
Cp, Cpk	Índices capacidade de processo
σ	Desvio padrão (<i>Standard deviation</i>)
Min	Mínimo
Max	Máximo

Capítulo 1

Introdução

Actualmente, a necessidade de soluções tecnológicas que se apresentem flexíveis e eficientes é cada vez maior, justificada pela crescente exigência de mercado que se tem vindo a desenrolar ao longo dos últimos anos. A crescente integração nas mais diversas áreas implica uma correspondência face às expectativas criadas em relação a novas tecnologias e à sua consequente aplicação industrial. As fibras ópticas surgem neste contexto e sofrem uma rápida evolução num espaço de tempo relativamente reduzido, intervindo de uma forma significativa nos mais diversos campos do sector tecnológico. Aparecem, sobretudo, como resposta ao desenvolvimento e massificação das telecomunicações provocada pela necessidade intrínseca de serviços inerentes ao contacto permanente e global de um crescente número de indivíduos.

Actuam, integrando sistemas de alto desempenho em termos de quantidade de tráfego, distância e taxas de transmissão e levam à proliferação de dispositivos que consigam acompanhar esta evolução. Em paralelo assistiu-se à exploração das vantagens tecnológicas das fibras ópticas numa área distinta das comunicações - a monitorização.

Contudo, não podemos dissociar estas duas importantes áreas, uma vez que elas próprias estão interligadas. Os sensores em fibra óptica surgem como consequência de uma investigação intensa na tecnologia das fibras ópticas e da proliferação dos componentes a ela associados, destinados originalmente a aplicações ligadas às comunicações.

O interesse das fibras ópticas no ramo da monitorização surge intimamente associado às características e propriedades que estas apresentam na medição remota e multiplexada de diversos parâmetros físicos em ambientes com elevado ruído electromagnético e/ou com elevado risco de ignição, desde que as extremidades da fibra óptica em uso, não possuem partículas, passíveis de ignição e não estejam directamente expostas a ambientes explosivos [1]. Os sensores de fibra óptica constituem uma alternativa válida, em termos de performance e custo, para a monitorização em tempo real de estruturas diversas - a elevada sensibilidade, o peso e tamanho reduzidos, a

ausência de emissões e/ou sensibilidade EMI/RFI, a operação segura em ambientes perigosos, a elevada largura de banda da fibra óptica, etc., são alguns dos seus principais argumentos.

Dos vários dispositivos que merecem destaque pela sua importância em aplicações tanto no campo dos sensores como na área das telecomunicações, existe um com particular interesse e que assume um papel central na elaboração deste projecto, as redes de Bragg em fibra óptica. Uma rede de Bragg é essencialmente uma microestrutura de dimensões reduzidas (inferior a 1 cm) que pode ser induzida no núcleo de uma fibra óptica por métodos diversos utilizando radiação UV. Essa microestrutura consiste numa alteração periódica e localizada do índice de refração que, quando iluminada convenientemente, reflecte luz com características dependentes da influência de várias grandezas físicas naquela, e só naquela, porção de fibra óptica. As duas características essenciais que tornam os sensores de Bragg tão apetecíveis para as aplicações de Engenharia Civil são a capacidade de multiplexagem e a auto-referenciação. A multiplexagem permite que inúmeros sensores possam ser integrados numa só fibra óptica e interrogados recorrendo a um único equipamento. Por sua vez, a auto-referenciação garante que as medições podem ser sempre feitas tendo como referência a primeira medição (feita aquando da fabricação do sensor, ou da instalação do mesmo), permitindo a medição de grandezas com carácter absoluto, das quais o exemplo mais comum é a temperatura.

1.1 - Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos. O capítulo 1 trata de contextualizar o âmbito do trabalho, nomeadamente, desde a base tecnológica que o suporta, até à aplicação do presente trabalho. O capítulo 2 faz o balanço da pesquisa efectuada sobre métodos, procedimentos e sistemas de calibração de sensores convencionais, apresentando fundamentos de entidades credíveis e de referência a nível mundial. O capítulo 3 apresenta a descrição pormenorizada do desenvolvimento, implementação e os respectivos ensaios experimentais do sistema de calibração para sensores de temperatura baseados em redes de Bragg. Dividido fundamentalmente em dois tópicos fundamentais: i) o sistema de calibração, baseado numa câmara de ciclos térmicos de dimensão considerável; ii) o sistema de calibração *FSBlockCalibrator*, de dimensões reduzidas. O capítulo 4 aborda a temática da análise estatística do processo de calibração. É inicialmente abordado a teoria matemática base e posteriormente, a sua aplicação a dados reais, com a devida análise e a extracção das respectivas conclusões. No capítulo 5, sugere-se os desenvolvimentos futuros, com o objectivo de melhoria contínua e optimização do sistema e procedimentos de calibração. Nos anexos, detalham-se os pormenores de implementação das aplicações de software desenvolvidas no âmbito deste trabalho. Deliberadamente, não foi retirada a cor às figuras deste documento, provenientes das aplicações de software desenvolvidas no âmbito deste trabalho, pois pretende-se também transmitir ao leitor, o desenvolvimento efectuado no interface gráfico dessas aplicações. Nas tabelas de dados apresentadas, os números são

apresentados deliberadamente com excessivo número de casas decimais, e não em formato de engenharia, uma vez que foram retirados directamente das folhas de cálculo, privilegiando-se assim a não alteração do seu formato.

1.2 - Sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg

As redes de Bragg em fibra óptica constituem um tipo de segmento de redes de difracção que actuam de forma intrínseca à propagação ao longo das fibras ópticas, permitindo a filtragem em reflexão de certos comprimentos de onda do espectro da luz incidente e a transmissão sem perdas dos restantes. A Figura 1.1 [2] esquematiza o conceito associado ao funcionamento das redes de Bragg.

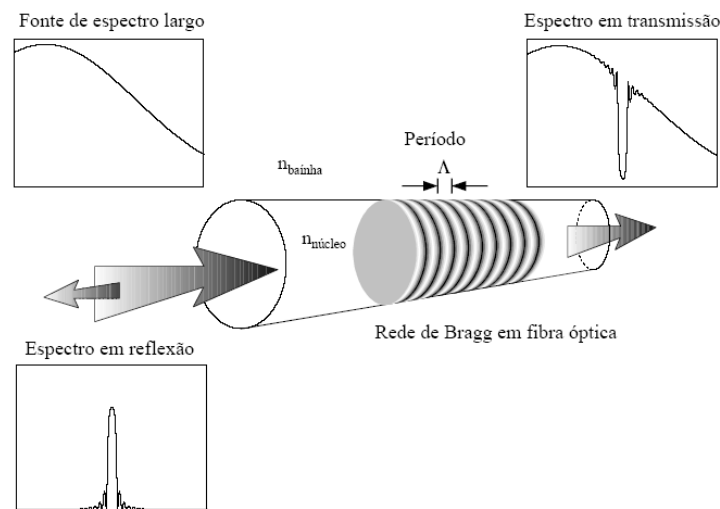


Figura 1.1 - Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra óptica.

Este comportamento é conseguido através da modificação periódica do índice de refração de pequenas secções do núcleo da fibra fazendo com que este se torne ligeiramente superior ao nominal. Em resultado, a estrutura, comumente denominada por rede de Bragg (Fiber Bragg Grating - FBG) irá transmitir a maioria dos comprimentos de onda da luz reflectindo outros, específicos, actuando de uma forma idêntica a um filtro ressonante. Quando a luz que se propaga no núcleo da fibra óptica incide nesta estrutura, uma certa porção é dispersada em cada período de modulação. Em condições específicas, a dispersão acontece em fase para o modo contrapropagante e é estabelecida uma forte condição de ressonância denominada por condição de Bragg [2]:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda , \quad (1.1)$$

Onde n_{eff} representa o índice de refacção efectivo do núcleo, λ_B o comprimento de onda de ressonância da rede de difracção e Λ o período da modulação do índice. A reflexão da luz que se propaga ao longo da fibra é assim possível para uma gama restrita de comprimentos de onda para os quais a condição de Bragg é satisfeita. Os restantes comprimentos de onda não são afectados com a excepção de lóbulos laterais que ocorrem frequentemente no espectro de reflexão.

Os sensores que possuem na sua constituição redes de Bragg são apropriados à integração directa no material que compõe as estruturas a monitorizar. Podem ser inseridos directamente em cimento, plásticos ou materiais compósitos ou acoplados a materiais auxiliares como a sílica ou metal, para possibilitar a medição de grandezas físicas de interesse.

As reduzidas perdas de transmissão de sinal em longas distâncias tornam viável a sua utilização para monitorizar grandes estruturas de engenharia civil como pontes, túneis, barragens, etc. As redes de Bragg têm ainda a capacidade de poder ser integradas em ambientes com elevado ruído electromagnético e/ou com elevado risco de ignição, desde que as extremidades da fibra óptica em uso, não possuem partículas, passíveis de ignição e não estejam directamente expostas a ambientes explosivos [1], tornando-as numa solução muito competitiva na monitorização de grandes máquinas eléctricas ou na exploração petrolífera.

1.3 - Sensor de temperatura baseado em redes de Bragg: conceito

As redes de Bragg, como parte integrante da fibra óptica, são sensíveis à aplicação de grandezas físicas, na mesma medida que a própria matriz de sílica (material que constitui o núcleo da fibra óptica). As propriedades espectrais das redes de Bragg dependem directamente de grandezas como a temperatura e a tensão mecânica [2]. Através da seguinte equação da relação de Bragg na sua forma diferencial, sendo Δn_{efc} a variação do índice de refacção e $\Delta\Lambda$ a variação do período do índice de modulação e o $\Delta\lambda_B$ a variação do comprimento de onda de ressonância da rede de difracção:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{\Delta n_{efc}}{n_{efc}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right), \quad (1.2)$$

A aplicação de qualquer grandeza que provoque uma alteração do índice refacção ou do período da modulação do índice induz um desvio no comprimento de onda ressonante. O princípio básico de operação dos sensores de Bragg baseia-se então na medição dos desvios em comprimento de onda induzidos na condição de ressonância por variação, entre outros, da temperatura.

A sensibilidade à temperatura dos sensores de Bragg resulta da expansão térmica da matriz sílica e da dependência do índice de refração com a temperatura. Assim, para uma variação da temperatura ΔT , sendo α o coeficiente de expansão térmica e ξ o coeficiente termo-óptico da sílica, o correspondente desvio na ressonância de Bragg é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T, \quad (1.3)$$

No caso da sílica, o coeficiente de expansão térmica tem o valor de $0.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e o coeficiente termo-óptico o valor de $5.76 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; pelo que, na presença de variações da temperatura, a alteração do comprimento de onda ressonante é dominada pela variação do índice de refração, provocado pela própria variação de temperatura.

A Figura 1.2 permite a visualização da variação do comprimento de onda da resposta espectral em função da temperatura, para um comprimento de onda de 1550 nm. Os dados teóricos, determinados a partir da equação 1.3, resultam num coeficiente de sensibilidade espectral térmica de aproximadamente $9.78 \text{ pm/}^\circ\text{C}$.

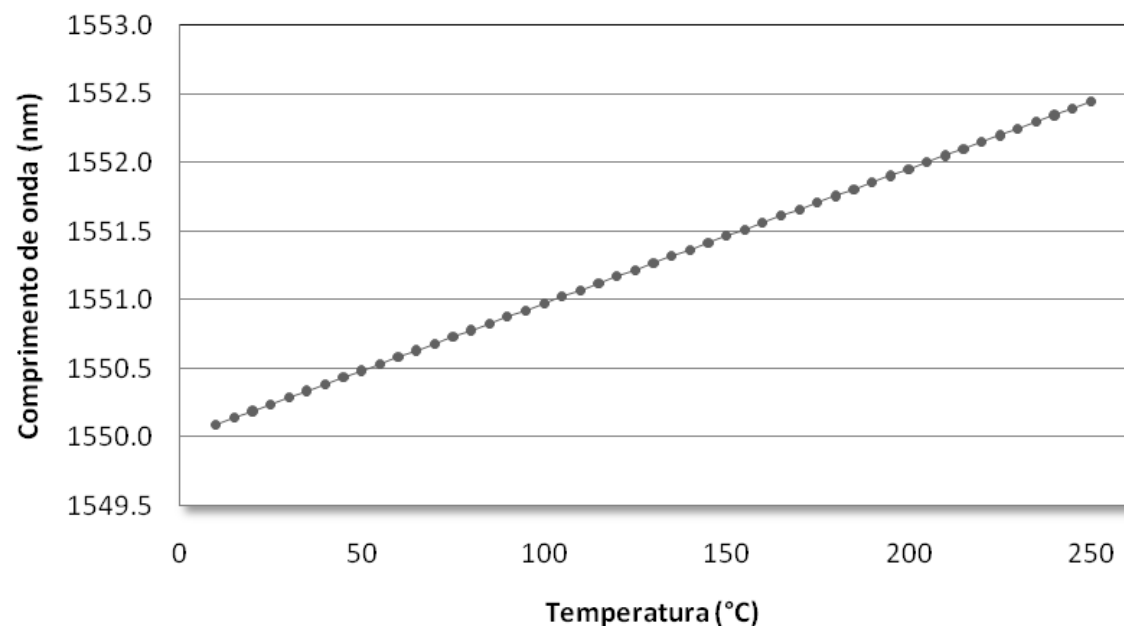


Figura 1.2 - Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura.

Como mencionado anteriormente, as propriedades espectrais das redes de Bragg dependem não somente da variação da temperatura, mas também da tensão mecânica, pelo que, surge então a necessidade de eliminação da sensibilidade cruzada devido à tensão mecânica, através de implementação de sofisticadas técnicas de construção do sensor.

As inúmeras aplicações passíveis de utilização deste conceito tecnológico, tanto na indústria, como na construção civil ou em ambiente laboratorial, necessitam que esta estrutura (FBG) permaneça minimamente protegida do manuseamento directo, de elementos externos agressivos e também se adeque estrutural e fisicamente à sua finalidade de monitorização, pelo que, requer a necessidade de aplicação de encapsulamento projectado à medida das mais diversas solicitações. Desta forma, existe a necessidade de caracterização do sensor de temperatura, como um elemento único final, assim como a necessidade imperativa de desenvolver, otimizar e explorar procedimentos de calibração e caracterização.

Para o utilizador final do sensor de temperatura, existe a clara necessidade de consultar um documento – *Folha de Calibração (Calibration Sheet)*, único para cada sensor, que permitirá a informação do cálculo que transforma o valor absoluto do comprimento de onda, intrínsecos à tecnologia Bragg, em medição absoluta de temperatura.

Capítulo 2

Métodos/sistemas de calibração de sensores convencionais de temperatura

2.1 - Introdução

Neste capítulo será abordada a pesquisa realizada sobre métodos e sistemas de calibração de sensores convencionais de temperatura.

Na literatura actual de metrologia de referência, nomeadamente do documento VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia) [3], é mencionada uma definição dos conceitos “Calibração” e “Validação”, que se pretende tão ampla quanto os diferentes universos de aplicação, os quais se transcreve na íntegra:

«Calibração / Calibration / Étalonnage

Operação que, em condições especificadas, num primeiro passo, estabelece a relação entre os valores da grandeza com incertezas de medição provenientes de padrões e as indicações correspondentes com incertezas de medição associadas e, num segundo passo, usa esta informação para estabelecer uma relação para obter o resultado de medição de uma indicação. NOTA 1: Uma calibração pode ser expressa sob a forma de um enunciado, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração, ou uma tabela de calibração. Em alguns casos, pode consistir numa correcção aditiva ou multiplicativa da indicação com uma incerteza de medição associada. NOTA 2: A calibração não deve ser confundida com o ajuste de um sistema de medição, muitas vezes denominado erradamente “auto-calibração”, nem com a verificação da calibração. NOTA 3: Frequentemente, o primeiro passo da definição é tomado como sendo a calibração.»

«Validação / Validation / Validation

Verificação de que os requisitos especificados são adequados para determinado uso.»

É com base nesta definição formal, mas essencialmente, objectiva e clara quanto possível, que as matérias, métodos e procedimentos se regulam.

2.2 - Sensores eléctricos

Em termos tecnológicos, existem fundamentalmente quatro tipos de sensores eléctricos indicados para a medição de temperatura:

- **Detector de Temperatura por Resistência** (Resistance Temperature Detectors). Baseiam-se na variação da resistência eléctrica dos materiais com a temperatura, sendo os mais tipicamente usados os sensores que utilizam platina como material resistivo, denominados Termómetro de Resistência de Platina (Platinum Resistance Thermometers). Possuem tipicamente valores de exactidão entre 0.1 e 0.01°C, embora a sua compra é mais dispendiosa, quando comparada com sensores do tipo termopar.



Figura 2.1 – Exemplo de Detector de Temperatura por Resistência.

Termopares (thermocouples). Baseiam-se no efeito *Seebeck* – tensão eléctrica que se gera na junção de dois metais distintos e que é função da temperatura. A sua compra pode ser pouco ou bastante dispendiosa, consoante o tipo de termopar escolhido: tipo K, tipo E, tipo J, tipo N, tipo B, tipo R, tipo S. Cada tipo, tem a sua gama de temperaturas de funcionamento e o material de construção específico de cada um, mostrando uma variedade muito alargada de utilizações.



Figura 2.2 – Exemplo de Termopar.

Termistores (Thermistors). Trata-se de semicondutores sensíveis à temperatura, evidenciando uma forte variação da resistência face à temperatura. Podem ser do tipo NTC, se a variação da resistência é negativa, conforme a temperatura aumenta; ou do tipo PTC, se a variação da resistência é positiva, conforme a temperatura aumenta.



Figura 2.3 – Exemplo de Termistor.

- **Sensores temperatura circuitos integrados** – de tamanhos reduzidos, são excelentes para a monitorização em dimensões reduzidas, no entanto, as suas gamas de operação são ainda reduzidas.



Figura 2.4 – Exemplo de sensor temperatura em Circuito Integrado.

2.3 - Sensores ópticos e sensores convencionais: considerações

Os sensores em fibra óptica são bastante atractivos por oferecerem diversas vantagens em comparação com os sensores eléctricos convencionais, tais como transmissão com baixas perdas, a excelente imunidade a interferências electromagnéticas, as suas reduzidas dimensões e peso e excelente isolamento eléctrico. Também apresentam as vantagens de suportarem altas temperaturas e serem passíveis de utilização em ambientes químicos com elevados riscos de ignição ou explosão - desde que respeitem as condições da referência [1]. No entanto, a sua tecnologia recente acarreta necessariamente custos de desenvolvimento, o que implica um custo mais elevado quando comparado com os sensores convencionais, quando visto do ponto de vista de um elemento simples. No entanto, devido à sua capacidade de multiplexagem, i.e., a integração numa única fibra óptica composta por diversos sensores, sem recurso a “circuitos paralelo”, à semelhança dos sensores convencionais, permite que em soluções que englobam algumas unidades de sensores de fibra óptica, passe a ser uma solução mais vantajosa em termos de custo, face à solução possível com sensores convencionais.

2.4 - Estado de arte: métodos e procedimentos de calibração

Considerado um dos pilares fundamentais da ciência da medição - Metrologia e principalmente na definição e desenvolvimento de standards - o NIST (National Institute of Standards and Technology) enfoca a sua descrição de métodos e procedimento de calibração em sensores termopares [4], pois são dispositivos eléctricos com larga aplicação para medição de temperatura. O procedimento de calibração de termopares é dividido em três métodos gerais distintos:

i) **Método de comparação a Termopar de referência calibrado.**

Este método é baseado na comparação dos valores obtidos pelo termopar a ser calibrado e um termopar de referência ou padrão (tipo R ou S), ambos nas mesmas condições de medição. É utilizado um forno de alta temperatura, em forma de tubo (*horizontal tube-type furnace*). Os dados da calibração são obtidos pela medição da Força Electromotriz

(f.e.m) do termopar de referência e a f.e.m. do termopar em teste. A gama de temperaturas de calibração é tipicamente iniciada em 1100°C e diminui até aos 100°C, em intervalos de 30°C. No caso de sensores de gama de temperatura elevada é efectuado o início da calibração aos 800°C e vai aumentando até 1600°C, também em intervalos de 30°C. Estes dados são posteriormente tratados de modo a obter uma tabela de temperatura versus f.e.m., com intervalos de 1°C, com as unidades da f.e.m. em milivolts, arredondado para o microvolt e as unidades da temperatura em °C ou °F.

Para um dos tipos de sensor termopar exemplo, os dados são divididos em três gamas de temperaturas, de modo a que:

1. Na gama de temperatura mais baixa, seja efectuada uma aproximação polinomial de grau 4, pelo método de mínimos quadrados (*least squares*).
2. Na gama intermédia, seja efectuada uma aproximação polinomial de grau 2, pelo método de mínimos quadrados (*least squares*).
3. Na gama de temperatura superior, o polinómio de ordem 2, proveniente da gama intermédia é extrapolado linearmente.

Resumindo, quando o forno atinge o equilíbrio e estabilidade térmica numa dada temperatura, esta pode ser determinada pelo termopar de referência acoplado ao sistema de medição, estabelecendo-se a correlação com cada termopar a ser calibrado. Por ser mais simples e não exigir meios laboratoriais muito sofisticados este método é o mais utilizado na indústria.

ii) **Método por comparação a um standard platinum resistance thermometer (PRT).**

É o método utilizado recorrentemente em calibrações na gama de temperatura entre os -110°C e 540°C, e em pontos fixos -183°C (ponto ebulição oxigénio) e -196°C (ponto de ebulição do nitrogénio). Estas calibrações são executadas tipicamente numa série de banhos líquidos, que estão a uma temperatura constante e têm um fluxo do líquido de modo a uniformizar a temperatura nos volumes usados no sistema de calibração. Para avaliar o gradiente de temperatura nos banhos, são utilizados três pontas de prova platinum resistance thermometer (PRT), em diferentes localizações e a diferentes níveis de imersão. A máxima diferença medida pelos PRT's em simultâneo e em cada temperatura é referenciada como o valor de *gradiente de temperatura*, importante para as considerações de condições da calibração e ter em consideração essa flutuação nos parâmetros da calibração.

Os banhos utilizados dependem essencialmente da gama de temperatura a calibrar:

- **Banho em água e óleos;**
- **Banho em estanho;**
- **Banho em crióstato;**
- **Banho em oxigénio líquido e nitrogénio líquido;**

O procedimento baseia-se na protecção inicial dos fios condutores em fibra de vidro, de modo a obter um bom isolamento. Posteriormente é colocado o termopar num tudo de vidro, antes da inserção no banho. Em certas situações, nomeadamente para calibrar a 0°C, usa-se tricloroetileno entre o vidro e o sensor, para aumentar a condutividade térmica. Para realizar as leituras do termopar (TC) e da referência platinum resistente thermometer (PRT), é utilizado o mesmo circuito eléctrico, utilizando um potenciómetro e uma ponte automática (bridge).

Segue-se a estrutura do procedimento:

- i) Diariamente é verificada a PRT utilizada como referência, através da medição da resistência no *ponto triplo da água*¹, durante aproximadamente 15 minutos. Comparado com valores anteriores, se variar mais do que 0.001°C, a PRT é enviada para o laboratório credenciado para re-calibração;
- ii) São realizadas 3 leituras, seguindo a seguinte sequência: PRT, TC, PRT, TC, PRT;
- iii) Às duas medições de TC é aplicada a média das medidas;
- iv) É aplicada a correcção do potenciómetro;
- v) Os dados são normalizados à temperatura desejada (referência);
- vi) Se a temperatura do banho sofrer uma alteração maior do que 0.05°C, durante a sequência de leitura, então a sequência anterior é descartada e é realizada uma nova leitura;
- vii) Os valores de f.e.m., determinadas durante a calibração são reportados às temperaturas medidas.

iii) Método de calibração absoluta ou por ponto fixo

Esse método baseia-se no levantamento do sinal gerado por um termopar em vários pontos fixos de temperatura como pontos de solidificação, ebulição e pontos triplos de substâncias puras, padronizadas inicialmente pela IPTS-68 (New International Practical Temperature Scale) e actualmente pela ITS-90 (Internacional Temperature Scale of 1990).

Resumidamente, para a realização da calibração, coloca-se o sensor a calibrar submetido a temperatura referente a esses pontos fixos e faz-se a leitura do sinal gerado com um equipamento de referência. O sinal lido é comparado com o valor conhecido do ponto fixo, verificando-se qual o desvio do sensor em relação ao ponto fixo. Esse procedimento é repetido em vários outros pontos fixos conhecidos, ver tabela 2.1 [5], de modo a cobrir toda a gama de temperatura pretendida. Este é um método de elevadíssimo rigor, no entanto, de custo elevado, pois exige meios laboratoriais sofisticados e pessoal técnico extremamente qualificado.

¹ O *ponto triplo da água* é obtido à temperatura de exactamente 273,16 kelvin (ou 0.01 °C) e a pressão de 611.73 pascal (cerca de 0.006 bar) nas quais os três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) coexistem em equilíbrio termodinâmico.

2.5 - Estado de arte: sistemas de calibração

Poder-se-á resumir que existem três tipos de calibradores de sensores de temperatura:

- i) **Sistema baseado em banho de imersão térmico (*Bath Calibrator*)**, em água, óleo, álcool, estanho, etc. A principal vantagem é a uniformização de temperatura do líquido. Além disso, obtêm-se reduzidos valores de gradiente de temperatura no banho a que o padrão de referência e o sensor a calibrar estão submetidos. A grande desvantagem é a sua complexidade de execução, por se tratar de imersão em líquidos, tratando-se de um sistema pouco “limpo”.



Figura 2.5 – Calibrador baseado em banho (*Bath Calibrator*).

- ii) **Sistema baseado em bloco seco (*Dry Block Calibrator*)**, utilizando o contacto térmico entre o calibrador e o sensor a calibrar ou pela transferência térmica entre o ar e o sensor a calibrar. A principal vantagem é a simplicidade de execução, por se tratar de um processo “limpo” e seco, ao contrário do sistema baseado na imersão em líquido. A principal desvantagem é a reduzida uniformização de temperaturas no interior do bloco, resultando num gradiente de temperatura mais elevado que o sistema baseado em banho térmico.



Figura 2.6 – Calibrador baseado em bloco seco (*Dry Block Calibrator*).

- iii) **Sistema baseado na comparação em pontos fixos**, utilizado em situações muito específicas e de necessidade de elevados valores de exactidão, acarretando um custo elevado, pois exige meios laboratoriais sofisticados e pessoal técnico extremamente qualificado. A principal vantagem é o valor da exactidão, sendo a maior desvantagem claramente o custo associado.

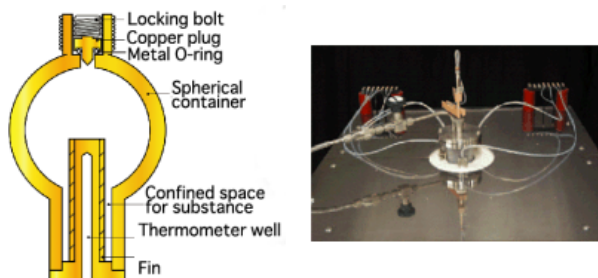


Figura 2.7 – Calibrador para comparação em pontos fixos.

Os diferentes tipos de equipamentos mencionados ainda variam entre si pelo rigor e exactidão das suas medições, influenciando naturalmente o seu preço, pelo que é possível encontrar 3 tipos de classes diferentes, consoante o padrão de referência usado:

- i) *General purpose system* - sistema de âmbito genérico, tipicamente para uso em ambientes industriais, fornecendo normalmente exactidão entre 1.0°C e 0.1°C , usando técnicas de comparação;
- ii) *Secondary standards system* - sistema de padrão secundário para comparações de elevada qualidade e comparações em ponto fixo, proporcionam exactidão geralmente entre 0.1°C e 0.01°C ;
- iii) *Primary standards system* - sistema de padrão primário para comparações de extrema e elevada qualidade, que proporciona exactidão geralmente até 0.001°C ;

Capítulo 3

Desenvolvimento e implementação de sistema de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg em fibra óptica

Neste capítulo será efectuada uma descrição resumida do processo de fabricação dos próprios sensores de Bragg e será descrito o sistema de calibração dos sensores de temperatura desenvolvido no âmbito deste trabalho. A inclusão da descrição inicial da construção do sensor é fundamental para contextualizar o papel da calibração dos sensores no processo de fabricação, não só pelo seu papel na calibração do sensor, mas também por desenrolar o importantíssimo papel de validação.

3.1 - Descrição do processo: fabricação e calibração com validação

A Figura 3.1 apresenta as diversas etapas do processo a que um sensor de temperatura baseado em redes de Bragg é submetido, desde a fabricação da rede de Bragg até à validação final.

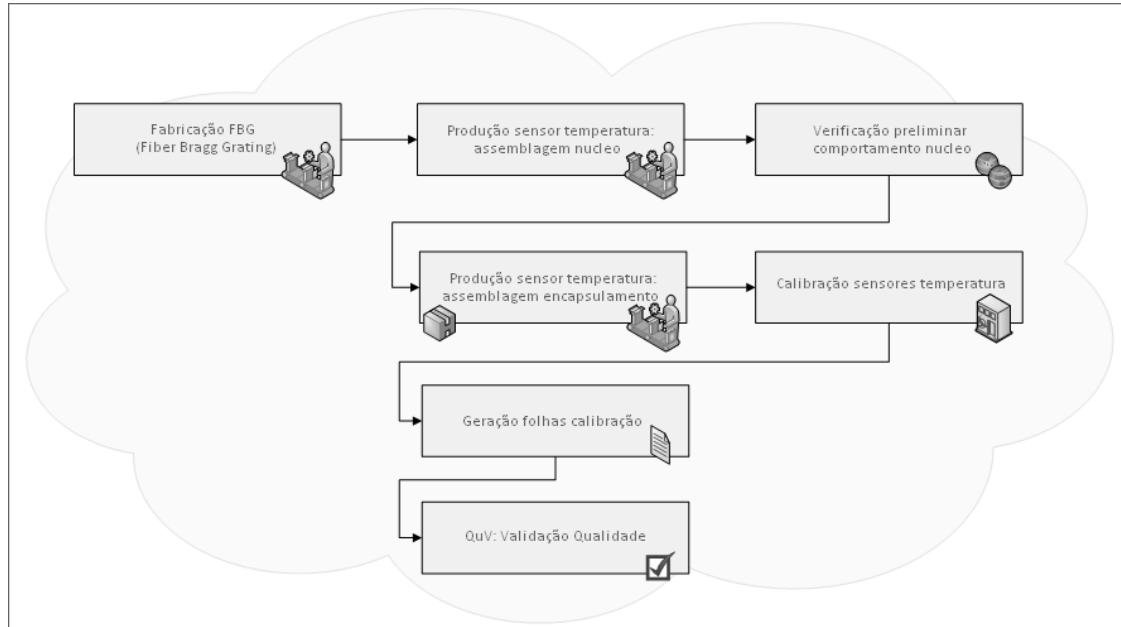


Figura 3.1 - Diagrama do processo produtivo de sensores de temperatura baseados em redes Bragg.

Fabricação da rede de Bragg

A etapa de fabricação do FBG é iniciada com o procedimento de fotossensibilização da fibra óptica com hidrogénio – processo de hidrogenização. Este processo consiste na exposição da fibra óptica a uma atmosfera saturada de hidrogénio, com uma pressão constante de aproximadamente 100 Bar e temperatura constante de aproximadamente 20°C, numa câmara hermética concebida para o efeito, durante um período pré-definido de tempo. Esta fibra saturada com hidrogénio é posteriormente exposta transversalmente durante aproximadamente 15 segundos a um feixe laser de excímeros KrF, que opera na gama do ultravioleta, por exposição através de uma máscara de fase – descrição no tópico “*Sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg*”. Após decorrida esta etapa, o FBG fabricado com um comprimento de onda central (CWL), cujo valor está ainda afectado pela presença de hidrogénio diluído na matriz de sílica. Para que esta componente, que afecta de forma reversível e indesejável o comprimento de onda do FBG, seja anulada, existe posteriormente uma etapa de remoção do hidrogénio e estabilização da resposta espectral do FBG de modo a que o CWL seja estável ao longo do tempo de vida do FBG, como sensor de temperatura, sendo-lhe também, atribuído posteriormente uma banda espectral. Esta etapa, resumidamente, consiste na exposição do FBG, a uma temperatura e humidade constantes, durante um período de tempo específico, numa câmara térmica.

Cada FBG fabricado é catalogado, segundo um código de identificação (FBGId) que permite reconhecer a sua banda, a semana e ano de fabrico e tipo de aplicação que irá ter o sensor propriamente dito, segundo o encapsulamento implementado – *Weldable*, *Embedded*, *Industrial Probe* ou *General Purpose*.

Produção sensor temperatura: montagem do núcleo

Uma vez atribuído um FBG a um sensor, através do seu número de série, inicia-se a etapa de fabricação do sensor de temperatura através da construção do seu núcleo, que engloba entre outros componentes e materiais, o próprio FBG.

Verificação preliminar do comportamento do núcleo

O núcleo do sensor devidamente construído e curado em termos de colagem é submetido a um perfil de temperatura de modo a que seja feita uma triagem preliminar do seu comportamento às variações de temperatura.

Produção sensor temperatura: encapsulamento

Após o sucesso na triagem da etapa anterior, finaliza-se, o encapsulamento exterior do sensor de temperatura, executando-se os procedimentos de montagem estabelecidos, segundo os materiais utilizados, os tipos de adesivos e tempos de curas estipulados. Esta etapa depende necessariamente do tipo de sensor a ser produzido, uma vez que, cada tipo tem o seu encapsulamento próprio e procedimentos específicos. Na Figura 3.2, pode-se visualizar três encapsulamentos distintos para sensores de temperatura baseados em redes de Bragg.



Figura 3.2 – Encapsulamentos típicos de sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg.

Calibração dos sensores de temperatura

É nesta etapa que se executa a caracterização e calibração do sensor de temperatura. O sensor é submetido a um perfil de temperatura e humidade referência, no sistema de calibração de sensores de temperatura, descrito detalhadamente neste capítulo, nos tópicos que se sucedem. Nesta etapa do processo é também realizada a validação do sensor.

Geração da Folha de Calibração

A decisão da etapa anterior, de validação do sensor, permitirá que o sensor de temperatura possa passar à etapa seguinte QuV, com o devido documento de calibração gerado *Folha de Calibração (Calibration Sheet)* ou retorne à fabricação para destruição ou reparação, no caso de reprovação. Os parâmetros de decisão irão ser abordados mais detalhadamente neste capítulo.

QuV: validação de qualidade

Após a realização da etapa de calibração do sensor de temperatura baseado em redes de Bragg, com a geração do *Folha de Calibração*, cada sensor é submetido a um novo perfil de temperatura. Este perfil é de menor duração quando comparado com o anterior e visa essencialmente validar a calibração realizada anteriormente: são usados os parâmetros resultantes da calibração – i.e., fórmula e comprimento de onda central ou CWL – e realiza-se uma verificação do máximo erro de medição do sensor. Deste modo, realiza-se um controlo final de Qualidade, com valores de temperatura típicos de utilização em funcionamento. Este procedimento será descrito de forma detalhada neste capítulo.

3.2 - Sistema de calibração de sensores de temperatura

Nesta secção será efectuada a descrição do sistema de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg.

O sistema de calibração eleito

O sistema comercial eleito, após a pesquisa e análise dos sistemas de calibração, é o indicado na Figura 2.6, baseado em **bloco seco**, do fornecedor *Ametek*, da **série JOFRA™ modelo ATC-155**, que possui uma gama de temperaturas de calibração desde **-24°C aos 155°C estáveis**, comunicação RS232, um consumo de 200VA, uma **resolução de 0.01°C**, uma **estabilidade** de $\pm 0.02^\circ\text{C}$ e uma **exactidão** para o **modelo B** de $\pm 0.04^\circ\text{C}$ (opção de uma RTD – Pt100) e **exactidão** para o **modelo A+B** de $\pm 0.19^\circ\text{C}$, com tempos de estabilização de patamares:

- i) De 23°C para -24°C de 37 minutos;
- ii) De 155°C para 23°C de 13 minutos;
- iii) De -24°C para 23°C de 4 minutos;
- iv) De 23°C para 155°C de 23 minutos.

No anexo 5, apresenta-se a brochura do equipamento descrito. De destacar as diversas configurações possíveis de utilizar, ver

Figura 3.3, consoante o tamanho do sensor a calibrar. O modelo escolhido à data tem o custo de aproximadamente 7.000 euros.

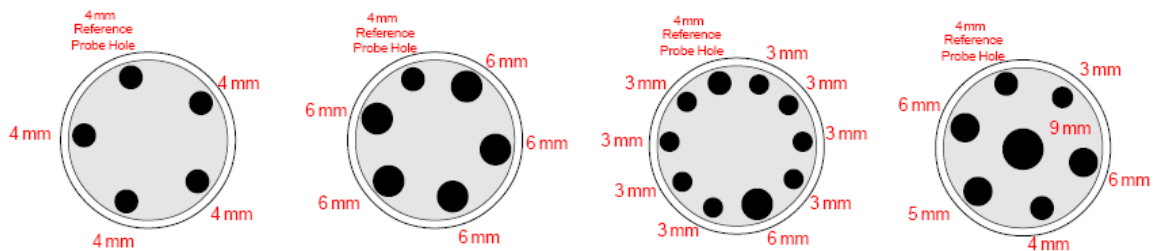


Figura 3.3 – Pormenor dos diversos blocos internos consoante o tamanho desejado do sensor a calibrar.

No entanto, o sistema eleito, como todos os outros encontrados no mercado, carece de um pormenor de importância fulcral, que leva ao entrave da compra de um sistema completo, a um fornecedor: aproximadamente 95% dos sensores de temperatura baseados em redes de Bragg são usados em ramos ópticos multiplexados em série com outros sensores de medição de temperatura ou até de outras grandezas, através da fusão da fibra óptica, havendo continuidade de fibra após a estrutura FBG. Ora, os equipamentos de calibração, não estão preparados para haver esta continuidade da fibra, pelo que apenas têm acesso por um lado, como se visualiza no pormenor de construção do bloco interior do modelo eleito, na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Pormenor do bloco interior usado no calibrador Ametek.

O sistema de calibração desenvolvido

O sistema inicialmente desenvolvido baseia-se numa mistura de dois tipos de sistema de calibração: em *banho* e *bloco seco*, uma vez que, é num ambiente fechado, à semelhança do tipo *banho*, mas não usa um líquido propriamente dito, mas sim o ar, à semelhança do sistema de calibração tipo *bloco seco*. Esta solução baseia-se na utilização de uma câmara de ciclos térmicos, fechada ao meio ambiente, que permite que os sensores estejam num “banho seco”, i.e., imersos num volume de ar com temperatura controlada. O sistema desenvolveu-se com base neste equipamento, uma vez que já tinha sido adquirido anteriormente para realizar ensaios de perfis de temperatura para o desenvolvimento de produtos, para aplicações inerentes ao processo da produção, nomeadamente, realização de procedimentos de compensação térmica, etc. e pelo facto de ser possível a utilização de sensores com continuidade em fibra óptica. Foi então seguida a estratégia de utilizar este equipamento para desenvolver o sistema, e uma vez estável a produzir as calibrações desejadas, dar-se início ao desenvolvimento de um sistema baseado em bloco seco, denominado *FSBlockCalibrator*, com todas as características dum modelo comercial, mas com a possibilidade de continuidade de fibra óptica.

3.2.1 Descrição do sistema: Hardware

O sistema de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg desenvolvido é composto pelos seguintes componentes:

3.2.1.1 Câmara de ciclos térmicos (Climatic Test Chamber)

Do fabricante Binder GmbH, da linha MKF, modelo 240, este equipamento, em conjunto com um computador desktop, permite a programação de ciclos térmicos, com controlo da temperatura e humidade.



Figura 3.5 – Câmara de ciclos térmicos Binder.

As suas principais especificações são:

Tabela 3.1 — Principais especificações técnicas da câmara MKF240

Parâmetro	Valor
Interior Width	800 mm
Interior Height	600 mm
Temperature range (Without humidity turned on)	-40 to +18o°C
Temperature fluctuation	± 0.1 to 0.4°C
Temperature variation	± 0.5 to 2.0°C
Heating up time from -40°C to 18o°C	48 minutes
Cooling down time from 18o°C to -40°C	122 minutes
Nominal Power	6000 W

3.2.1.2 Interrogador optoelectrónico de sensores baseados em redes de Bragg

Do fabricante FiberSensing, da linha BraggMETER, modelo FS4200, este equipamento permite uma solução muito vantajosa e de simples utilização para leitura de sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica.



Figura 3.6 – Interrogador optoelectrónico BraggMETER FS4200.

As suas principais especificações são:

Tabela 3.2 — Principais especificações técnicas do interrogador FS4200

Parâmetro	Valor
Battery autonomy (portable device)	3.5 hours
Weight	7.3kg
Optical channels	4 (in parallel)
Accuracy	1 pm
Resolution	1 pm
Repeatability	1 pm
Operating range	80 nm (1510 to 1590 nm)
Optical output power	-6 dBm
Optical connectors	FC/APC
Nominal Power	90 W

3.2.1.3 Sensor padrão secundário de temperatura PRT (5608) e medidor digital (1502A)

Do fabricante Fluke, o conjunto padrão secundário de temperatura é composto por:

- Ponta de prova PRT, da marca Fluke Hart Scientific, modelo 5608, Serial Number 00297;
- Medidor digital, da marca Fluke Hart Scientific, modelo 1502A.



Figura 3.7 – Sensor padrão secundário de temperatura PRT (5608) e medidor digital (1502A).

As suas principais especificações são: ²

Tabela 3.3 – Principais especificações técnicas do sensor padrão de temperatura PRT

Parâmetro	Valor
Temperature range	-200 °C to 500 °C
Temperature coefficient of resistance	0.0039250 Ω/Ω/°C
Nominal resistance at 0.01 °C	100 Ω ± 0.5 Ω
Short-term repeatability	± 0.01 °C at 0.010 °C ± 0.02 °C at max temp
Drift	± 0.01 °C at 0.010 °C ± 0.02 °C at max temp
Hysteresis	± 0.01 °C maximum
Sensor length	30 mm ± 5 mm
Sensor location	3 mm ± 1 mm from tip
Response time	9 seconds typical
Resistance at triple point of water at 1 mA measurement current at the end of stability test	100.0148 Ω
Probe characterization	ITS-90

² O parâmetro *Temperature coefficient of resistance*, com unidades Ω/Ω/°C simboliza o factor da variação da resistência por variação da temperatura.

Tabela 3.4 — Principais especificações técnicas do medidor digital

Parâmetro	Valor
Resistance range	0 Ω to 400 Ω
Resistance accuracy (subject of calibration)	0 Ω to 20 Ω : 0.0005 Ω 30 Ω to 400 Ω : 0.0015 % (15 ppm) of reading
Resistance resolution	0 Ω to 20 Ω : 0.0001 Ω 20 Ω to 400 Ω : 0.001 Ω
Temperature resolution	0.001 $^{\circ}\text{C}$
Measurement period	1 second
Communication	RS 232 serial standard
Nominal Power	10 W

3.2.1.4 Computador desktop

Para permitir o controlo da câmara de ciclos térmicos, através da aplicação específica *APTCOM* fornecida pelo fabricante (Binder) e para permitir a recepção dos dados do padrão secundário de temperatura, através da aplicação *ThermoMETER1502AReadOut.exe*³, desenvolvida para o efeito no âmbito do presente trabalho.

³ Para mais detalhes do desenvolvimento da aplicação, consultar anexo 1.

3.2.2 Procedimento de calibração

O conjunto de sensores de temperatura alvo de calibração é previamente distribuído em diversos ramos ópticos, de modo a que não se conjuguem num mesmo ramo óptico sensores com comprimentos de onda centrais semelhantes, como esquematizado na Figura 3.8, referente ao espectro óptico de um ramo típico. Este procedimento permite evitar a sobreposição de bandas espectrais entre sensores, com o prejuízo da validade dos dados recolhidos, comprometendo o sucesso do processo de calibração. A técnica de fusão de fibras ópticas é usualmente empregue para realizar estas séries de sensores.

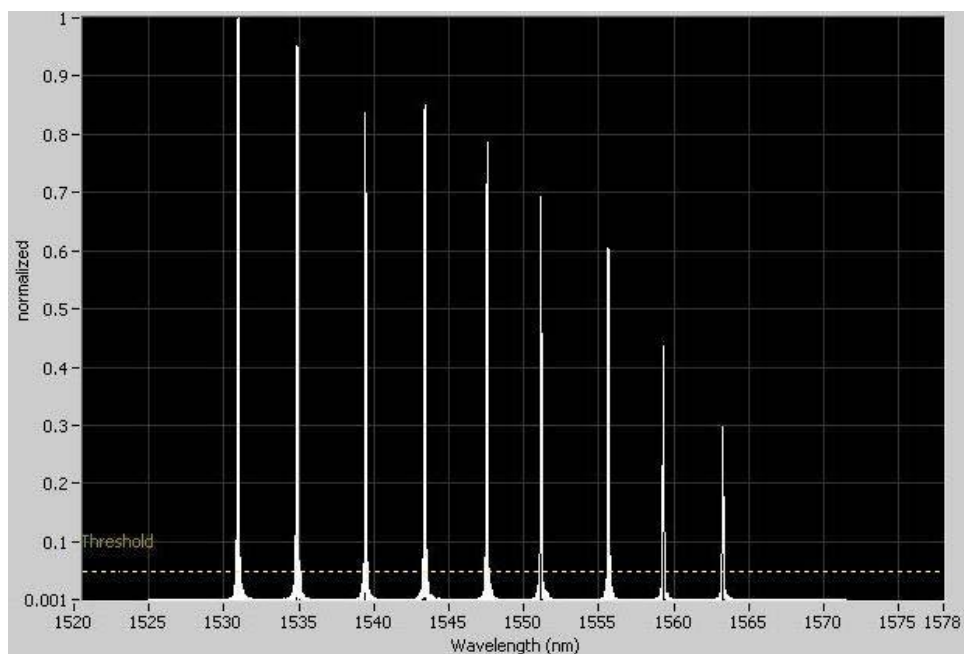


Figura 3.8 - Distribuição dos sensores de temperatura por canal óptico.

Os diversos sensores sob calibração, agrupados nos diferentes ramos ópticos, são colocados no interior da câmara de ciclos térmicos. Nesta etapa do processo existe o cuidado de não induzir perdas nos ramos ópticos, provocadas por curvatura excessiva da fibra óptica, que interliga os sensores em série. A posição preferencial dos sensores de temperatura a calibrar, dentro da câmara de ciclos térmicos, é no centro do volume interior da câmara, uma vez que, nesta posição existe uma maior uniformidade espacial da temperatura, como se pode visualizar na Figura 3.9.

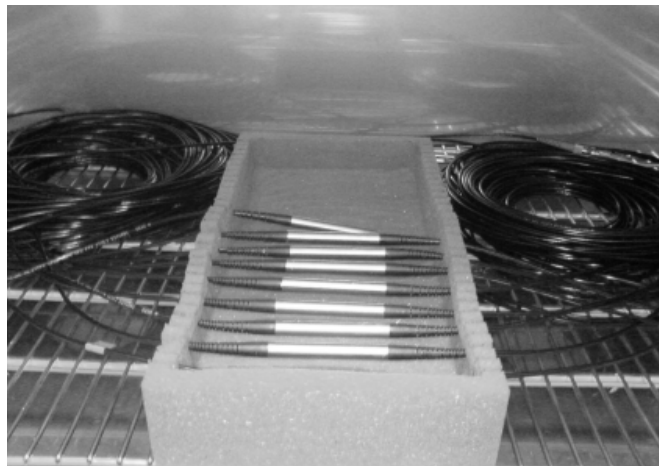


Figura 3.9 – Posicionamento dos sensores de temperatura a calibrar no interior da câmara de ciclos térmicos.

Posteriormente, cada ramo é conectado opticamente à unidade de interrogação optoelectrónica *BraggMETER FS4200*, para se proceder à recolha dos dados dos sensores ópticos.

Adicionalmente é introduzido também no interior da câmara de ciclos térmicos, a ponta de prova do sensor padrão secundário de temperatura *PRT*, usada posteriormente na calibração, como o padrão de referência de temperatura, em conjunto com o *medidor digital*. Em determinadas situações, nomeadamente, perante a calibração de sensores de temperatura com reduzido encapsulamento, isto é, com a estrutura FBG mais exposta a elementos externos, recorre-se ao auxílio de uma subestrutura *de volume reduzido*, esquematizada na Figura 3.10, que irá permitir uma maior uniformização da temperatura do volume onde se encontram os sensores de temperatura e o sensor padrão de temperatura *PRT*, minimizando deste modo, as flutuações de temperatura, intrínsecas da própria ventilação no interior da câmara de ciclos térmicos.



Figura 3.10 – Posicionamento do sensor padrão secundário de temperatura (5608) na câmara de ciclos térmicos e subestrutura para uniformizar a temperatura.

Esta estrutura é composta exteriormente por metal em aço-inóx, para funcionar como um escudo aerodinâmico parcial - perpendicular à maior deslocação de corrente de ar e de espessura mínima, para não ter demasiada inércia térmica; e interiormente por uma base de material em teflon, que além de ser um excelente impermeabilizador, tem também excelentes características de isolamento térmico, minimizando assim a inércia térmica do material, uma vez que este está em contacto com os sensores a calibrar.

É programada a câmara de ciclos térmicos, a uma temperatura de fixa de 30 °C, durante 1 hora, para se efectuar a estabilização e uniformização térmica de todo o conjunto reunido no seu interior. Posteriormente, é efectuado um *AutoScan*⁴ no equipamento *BraggMETER FS4200*, que irá auto configurar todos os sensores de temperatura, com o CWL (comprimento de onda central) corresponde à temperatura fixa de 30 °C, sendo este um dos parâmetros a ser adicionado posteriormente, na *Folha de Calibração*.

O equipamento *BraggMETER FS4200* permite a utilização e recolha de quatro canais ópticos em paralelo, com uma taxa de aquisição de 1 Hz. Os dados são disponibilizados através de ficheiros do tipo texto, com o formato de dados explicitado na tabela seguinte.

Tabela 3.5 — Formato dos dados gerados pelo equipamento BraggMETER FS4200

Data Set Name: Sample Rate: Initial Date: Final Date:				
op09007-20090219		1 Samples Per Second	19-02-2009 -- 16:54:39	20-02-2009 -- 7:30:03
Date	Time	Sensor1 -- x (1560.826393)	Sensor2 -- x (1529.015835)	Sensor3 -- x (1529.052273)
19-02-2009	16:54:39	-0.002137	-0.000173	-0.000171
19-02-2009	16:54:41	-0.001769	-0.000188	0.000015
19-02-2009	16:54:42	-0.000625	-0.000306	-0.000123
...				
20-02-2009	7:29:08	-0.009570	-0.009138	-0.005503
20-02-2009	7:29:09	-0.010047	-0.009152	-0.005281
20-02-2009	7:29:10	-0.009790	-0.008706	-0.005057
20-02-2009	7:29:11	-0.008635	-0.009650	-0.006007

⁴ *AutoScan* é uma funcionalidade disponível no equipamento *BraggMETER FS4200* que efectua uma procura automática dos sensores por canal óptico seleccionado e efectua automaticamente a configuração, dos sensores encontrados, com os parâmetros típicos.

Existe informação da data e hora de cada aquisição e informação da variação de comprimento de onda (nm) face ao CWL auto configurado previamente no equipamento e mencionado entre parêntesis, junto ao nome e fórmula de cada sensor, no cabeçalho do ficheiro de dados.

Proveniente do padrão de temperatura *PRT*, existe também um ficheiro de dados disponibilizado pela aplicação *ThermoMETER1502AReadOut.exe*⁵ gestora do equipamento de medição digital, que é um elemento crucial para a concretização da calibração dos sensores, com o formato explicitado na seguinte tabela.

Tabela 3.6 — Formato dos dados gerados pelo medidor digital

Date/Time	Value °C
20090312 19:08:08	29.543
20090312 19:08:09	29.543
...	
20090313 09:46:49	34.682
20090313 09:46:50	34.684

A Figura 3.11 esquematiza o perfil de temperatura típico, utilizado para a calibração dos sensores de temperatura baseados em redes de Bragg na gama entre -20°C e +80°C.

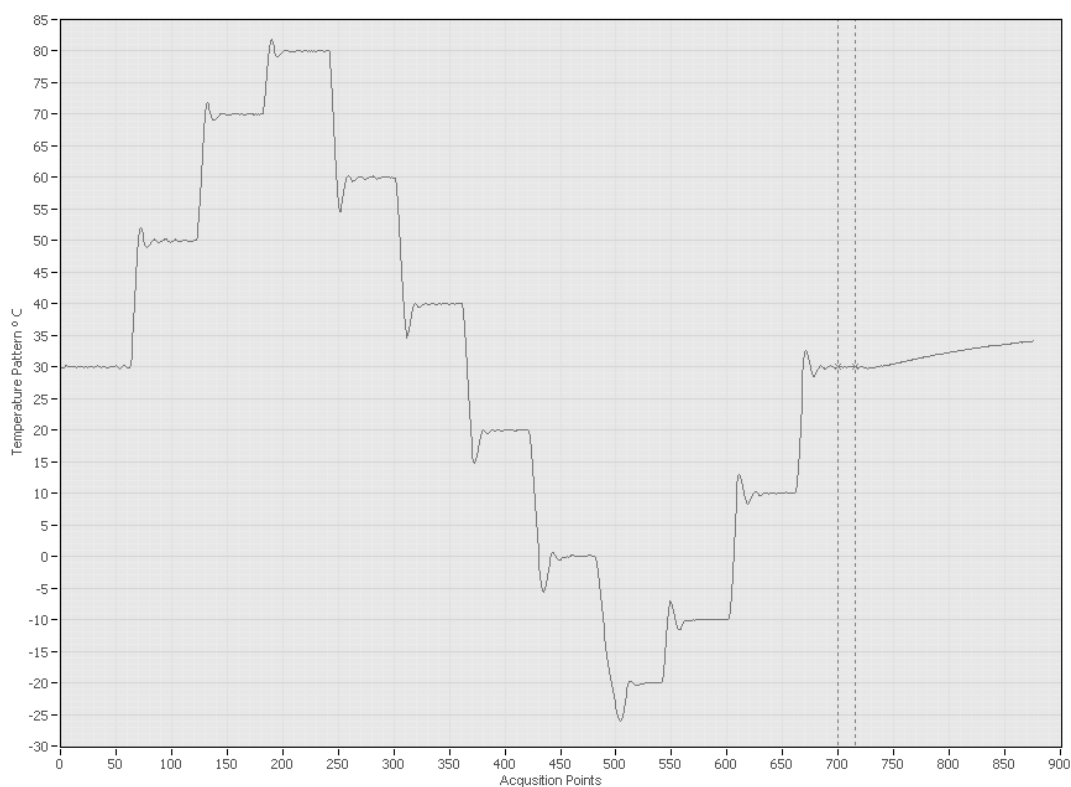


Figura 3.11 – Perfil de temperatura para a calibração de sensores baseados em redes Bragg.

⁵ Para mais detalhes do desenvolvimento da aplicação, consultar anexo 1.

Cada patamar de temperatura representado no gráfico corresponde a 1 hora, numa gama de temperatura de -20°C a 80°C. São portanto, 12 patamares, correspondendo a 12 horas no total, iniciando-se nos 30°C, seguindo-se uma subida para os 50°C, 70°C até aos 80°C, uma descida para os 60 °C, 40 °C, 20 °C, 0.1 °C, -20°C e voltando a subir para os -10 °C, 10 °C e voltando aos iniciais 30°C. Este perfil de temperatura é configurado e submetido através da aplicação APTCOM⁶, que permite o controlo da câmara de ciclos térmicos. Este perfil de temperatura permite não só realizar a calibração ao longo da gama de temperatura, mas também avaliar a histerese e identificar possíveis não-linearidades.

Após submeter os sensores ao perfil de temperatura, são recolhidos os ficheiros mencionados anteriormente – dados obtidos dos sensores de temperatura e dados obtidos do padrão de temperatura.

É então utilizada uma aplicação desenvolvida no âmbito deste trabalho denominada “TemperatureSensorCalibration”⁷ que permite:

- i) Efectuar uma criteriosa visualização do comportamento de cada um dos sensores, ao longo de todo o perfil de temperatura realizado, filtrando desta forma, sensores que apresentam falhas de leitura em determinados patamares (especialmente nos extremos), resultantes de efeitos que deterioram o desempenho dos sensores tais como deficientes curas de adesivos, assemblagens, pré-tensões, entre outros;
- ii) Efectuar a recolha dos valores médios reais do padrão de temperatura através da selecção parcial de cada patamar de referência, de modo a evitar *overshoots* provenientes das transições de temperatura entre patamares;
- iii) Efectuar a recolha dos valores médios reais de cada sensor de temperatura através da selecção parcial de cada patamar de referência, (ver Figura 3.12) de modo a evitar a selecção de indesejáveis *overshoots* provenientes das transições de temperatura entre patamares.

⁶ Aplicação proprietária do fabricante da câmara de ciclos térmicos Binder.

⁷ Para mais detalhes do desenvolvimento da aplicação, consultar o anexo 2.

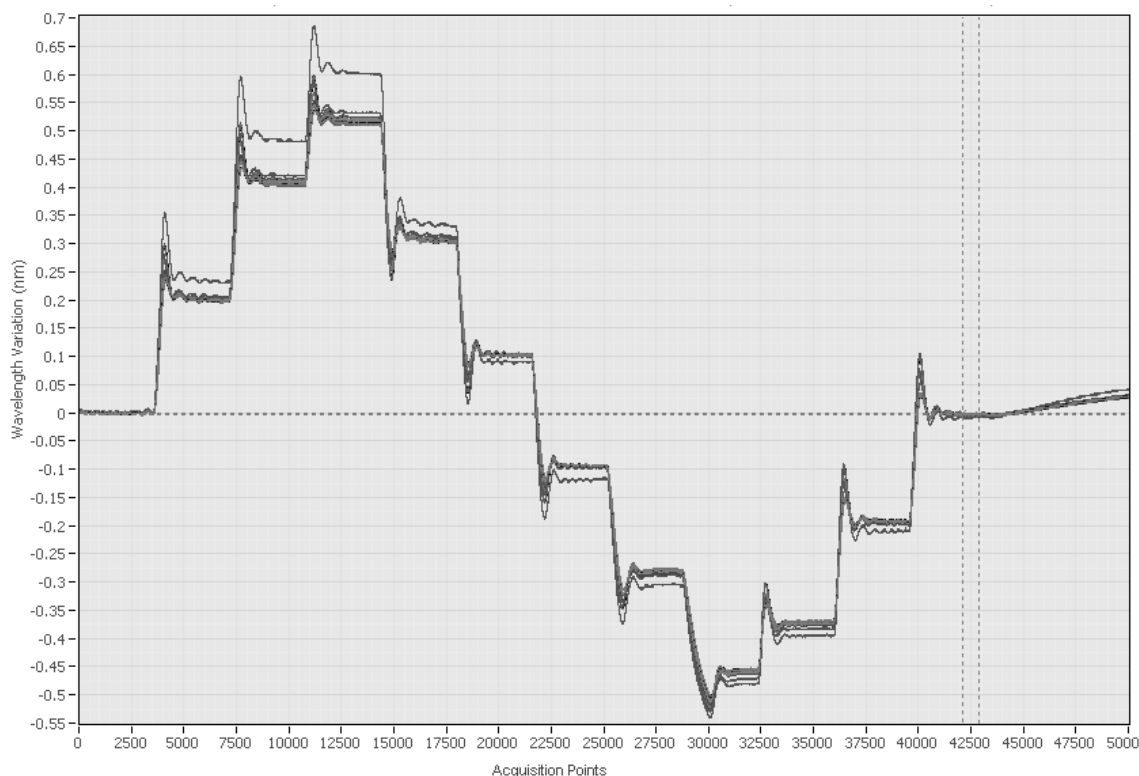


Figura 3.12 – Resposta dos sensores de temperatura ao perfil de temperatura submetido.

- iv) Para cada sensor é gerado um ficheiro em *Office Excel*, contendo a *Folha de Calibração* correspondente⁸;
- v) Actualização na base dados;

Deste modo é gerada de forma automática uma tabela com os valores médios da temperatura em cada patamar obtidos a partir da referência e os respectivos valores médios do desvio espectral de cada um dos sensores de Bragg relativamente ao comprimento de onda central a 30°C. Nesta etapa, a calibração dos sensores está finalizada, uma vez que foi gerado a *Folha de Calibração* individual para cada sensor. No entanto, existe uma etapa adicional de verificação de qualidade, que permite realizar uma validação à calibração propriamente dita. O resultado dessa verificação é também ele actualizado no *Folha de Calibração*, na área correspondente ao QuV, assim como actualizado o registo na base de dados. Os parâmetros extraídos da calibração que permitem a validação irão ser abordados no tópico «**Documento Folha de Calibração: etapa de calibração**».

⁸ Detalhes dos cálculos usados na *Calibration Sheet*, em pormenor, nos tópicos que se sucedem.

3.2.3 Procedimento QuV (Quality Validation)

A partir da *Folha de Calibração* é realizada a etapa de controlo de qualidade, que valida o procedimento de calibração. Para tal, os sensores que foram alvo da calibração deverão permanecer no interior da câmara de ciclos térmicos e na mesma localização, minimizando desta forma, a influência de flutuações de temperatura no interior da câmara de ciclos térmicos.

A configuração individual de cada sensor de temperatura, no equipamento *BraggMETER FS4200*, é editada, sendo introduzidos os seguintes parâmetros de calibração, gerados em cada um dos *Folha de Calibração*:

- i) Fórmula de conversão $T = S_2 \Delta\lambda^2 + S_1 \Delta\lambda + S_0$, sendo T a temperatura, S_2 o coeficiente de ordem 2, S_1 o coeficiente de ordem 1, S_0 o coeficiente de ordem 0 e $\Delta\lambda$ a variação de comprimento em relação ao comprimento de onda de referência a 30 °C;
- ii) Valor de «Reference Wavelength, CWL (nm) @ 30 °C».

Desta forma, o resultado apresentado pela medição do equipamento *BraggMETER FS4200* é automaticamente convertido em temperatura absoluta em graus Célsius.

É então programado e submetido um novo perfil de temperatura, com a duração de 3 horas, correspondendo aos valores de temperatura de 5°C, 25°C e 45°C.

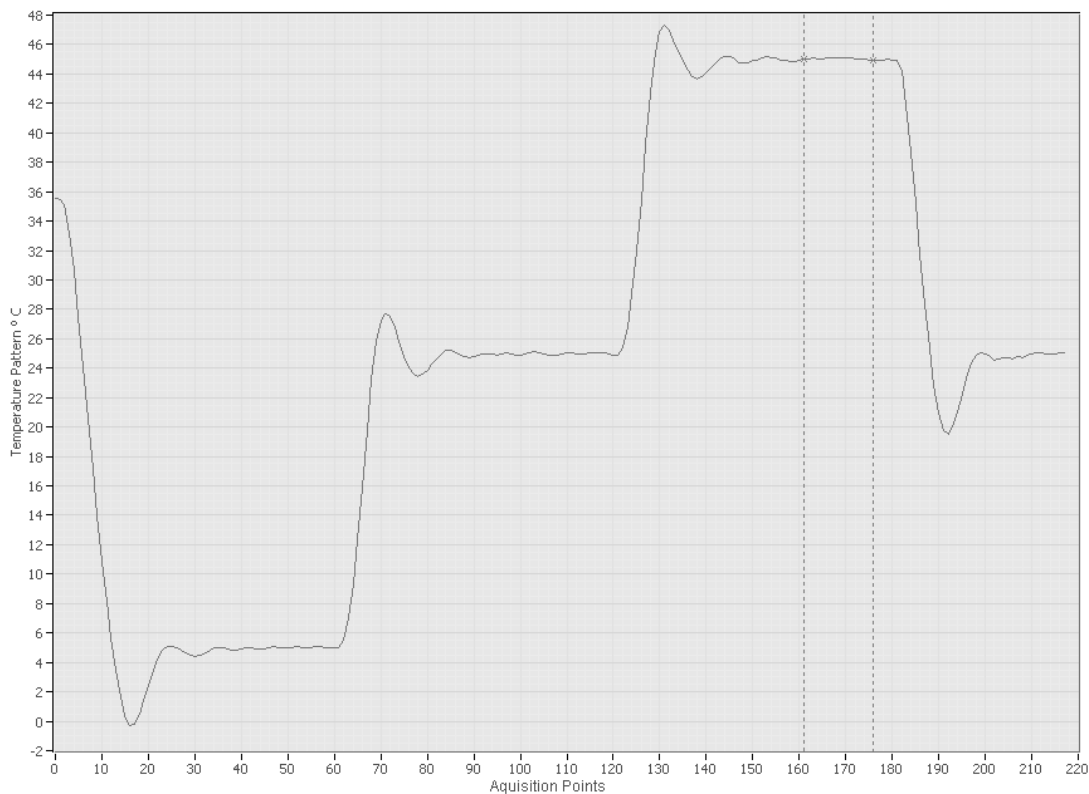


Figura 3.13 – Perfil do padrão de temperatura submetido para validação qualidade QuV.

Após a realização do novo perfil, os dados provenientes do padrão de temperatura são importados (ver Figura 3.13), assim como, os valores de temperatura medidos através dos sensores de temperatura calibrados no equipamento *BraggMETER FS4200*, usando a aplicação “TemperatureSensorCalibration”⁹, na qual é extraído o máximo erro - *Maximum QuV Error*, correspondendo à diferença entre os valores médios do padrão de temperatura em cada patamar e o valor médio da temperatura em cada patamar medido pelos sensores de temperatura calibrados:

$$QuVError = \text{Max}(|T_{patamar1} - T_{refpatamar1}|; |T_{patamar2} - T_{refpatamar2}|; |T_{patamar3} - T_{refpatamar3}|) \quad (3.1)$$

Se este valor *Maximum QuV Error* respeitar o critério inferior 0.5 °C, então o sensor calibrado em questão passou com sucesso esta etapa de verificação de qualidade. Se não respeita esta máxima tolerância, terá de ser reparado se possível ou mesmo destruído.

⁹ Para mais detalhes do desenvolvimento da aplicação, consultar o anexo 2.

3.2.4 Documento *Folha de Calibração*: etapa de calibração e resultados experimentais

Nesta secção são abordados os cálculos envolvidos no procedimento de calibração, isto é, a caracterização, os cálculos, as tolerâncias, os parâmetros de calibração, a aproximação polinomial, os indicadores de erro e a histerese, que compõem a *Folha de Calibração* individual de cada sensor de temperatura baseado em redes de Bragg. Inicialmente irá ser apresentada a justificação de utilização do ajuste polinomial de segunda ordem face à dependência linear apresentada inicialmente para o coeficiente termo-óptico.

Tal como abordado anteriormente, de forma teórica, se considerarmos que os coeficientes de expansão térmica e termo-óptico na equação 1.3 são constantes com a temperatura (valores mencionados anteriormente) então esta equação prevê uma relação linear entre a variação de temperatura e o desvio do comprimento de onda de Bragg. No entanto, verifica-se experimentalmente que a resposta é de facto quadrática (ver Figura 3.14), obtida por valores experimentais, após a fabricação de uma estrutura FBG.

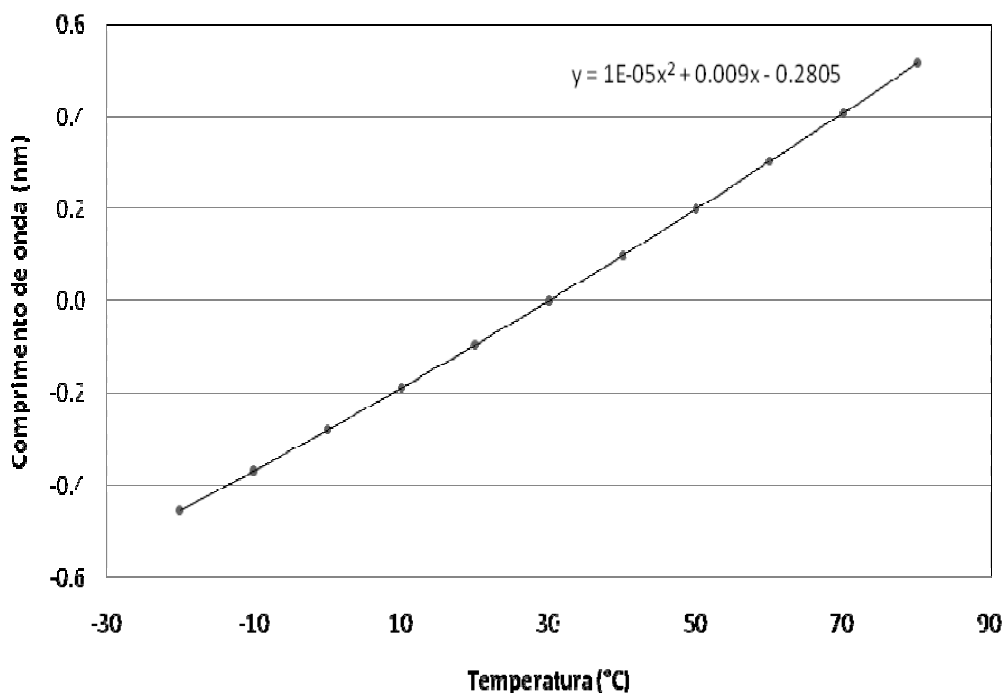


Figura 3.14 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura.

Este efeito é devido à dependência não-linear do coeficiente termo-óptico com a temperatura, razão pela qual se optou pelo aumento do rigor da calibração por aproximação polinomial de

segunda ordem, em vez da aproximação linear, como descrito na abordagem do conceito no capítulo 1.

É nesta etapa que se procede ao cálculo da calibração, sendo utilizado para tal, o auxílio de uma folha de cálculo *Office Excel*, que reúne as características fundamentais para utilização transversal: variedade de fórmulas matemáticas para cálculo e desenvolvimento de formatação de documento com muito boas características de interface gráfico.

Esta folha de cálculo é composta por quatro *sheets* desenvolvidas no presente trabalho (sub folhas de cálculo): «*internal data*», «*error (FOS)*», «*error hysteresis*» e «*Product sheet*».

3.2.4.1 Sheet «*internal data*»

Após a reunião dos dados extraídos da operação de submissão dos sensores de temperatura a calibrar, ao perfil de temperatura de doze horas (-20°C a + 80 °C), estes são inseridos na *Folha de Calibração*, mais especificamente no *sheet internal data*, através da aplicação “TemperatureSensorCalibration”¹⁰, como se pode visualizar na seguinte tabela:

Tabela 3.7 — Dados gerados da submissão dos sensores temperatura ao perfil de temperatura de doze horas (-20°C a + 80°C)

Init CWL Autoscan	
1541.560883	
T (°C)	Variation WL (nm)
30.55	0.003385
50.24	0.202247
70.59	0.416806
80.82	0.528484
60.70	0.316289
40.95	0.109956
20.92	-0.088231
0.95	-0.274804
-19.49	-0.457016
-9.70	-0.372307
10.25	-0.19135
30.44	0.001187

A coluna da esquerda corresponde aos valores médios de cada patamar de temperatura medidos pelo padrão de temperatura; a coluna da direita corresponde aos valores médios de variação de comprimento de onda, face ao comprimento de onda central medido a 30°C *Init CWL Autoscan*, também igualmente inserido neste *sheet*.

De realçar a existência de um desfasamento dos valores de temperatura medidos pelo padrão de temperatura, face aos valores teóricos pretendidos (valores inteiros naturais: 30, 50, 70, 80, 60, 40, 20, 0, -20, -10, 10, 30).

¹⁰ Para mais detalhes do desenvolvimento da aplicação, consultar o anexo 2.

Este desfasamento deve-se:

- i) À flutuação da temperatura, (temporal) da câmara de ciclos térmicos, cuja gama mencionada pelo fabricante é de ± 0.1 a ± 0.4 °C;
- ii) À variação de temperatura (espacial ou localização) no interior da câmara de ciclos térmicos, cuja gama mencionada pelo fabricante é ± 0.5 a ± 2.0 °C;

Portanto, a câmara de ciclos térmicos somente interage no sistema como gerador de perfil de temperatura, sendo o padrão secundário de temperatura (*PRT Probe 5608*) utilizado para a medição rigorosa da temperatura aplicada, que está devidamente calibrado, tendo como especificações anunciadas pelo fabricante, de *drift*¹¹ de ± 0.01 °C na gama de temperaturas usadas e uma incerteza de medição proveniente do equipamento digital de medição (*1502A*) devidamente calibrado, dada pelos valores de exactidão⁹ mencionados de 0.004°C@-100°C e 0.009°C@+100°C.

Para a definição da tolerância máxima de 0.5°C, para validação dos sensores de temperatura baseados em redes de Bragg, denominada *Maximum QuV Error*, teve-se em conta todas as especificações e a realização do levantamento das incertezas associadas ao sistema de calibração, apresentadas no tópico *Levantamento de incertezas da calibração*.

Retomando a descrição dos cálculos na *sheet internal data* da folha de cálculo - *Folha de Calibração (Calibration Sheet)*, são então realizados diversos cálculos auxiliares para a obtenção da aproximação de segunda ordem, que representa a fórmula de conversão de comprimento de onda em temperatura. Estes passos auxiliares são:

i) **Determinação do comprimento de onda absoluto a 30.0°C**

Para tal, efectua-se o cálculo que permite a transformação de variação de comprimento de onda em comprimento de onda absoluto, de cada patamar de temperatura:

$$WLi = CWL_{Patamar1} + \Delta WLi, \quad (3.2)$$

- Sendo WLi , o comprimento de onda absoluto do patamar i ;
- Sendo $CWL_{patamar1} = CWL_{AutoScan} + \Delta WL_1$, o comprimento de onda absoluto do patamar 1;
- Sendo $CWL_{AutoScan}$, o comprimento de onda absoluto realizado pelo *AutoScan*¹²;
- Sendo ΔWLi , a variação de comprimento de onda de cada patamar de temperatura.

¹¹ Para mais especificações, consultar o tópico «Ponta de prova *Platinum Resistance Thermometer* e termómetro digital *Thermometer Readout*»

¹² *AutoScan* é uma funcionalidade disponível no equipamento *BraggMETER FS4200* que efectua uma procura automática dos sensores por canal óptico seleccionado e efectua automaticamente a configuração, dos sensores encontrados, com os parâmetros típicos.

Resultando nos seguintes dados:

Tabela 3.8 — Dados transformados para comprimento de onda absoluto

T (°C)	WLi (nm)
30.55	1541.564268
50.24	1541.76313
70.59	1541.977689
80.82	1542.089367
60.70	1541.877172
40.95	1541.670839
20.92	1541.472652
0.95	1541.286079
-19.49	1541.103867
-9.70	1541.188576
10.25	1541.369533
30.44	1541.562070

De seguida, é aplicado a estes dados, a função *LINEST* (), que permite o cálculo da melhor equação que se adequa aos dados seleccionados, usando o método mínimos quadrados (*least squares*), como se visualiza na tabela de resultados seguinte:

Tabela 3.9 — Aproximação polinomial de segunda ordem aos dados em comprimento de onda absoluto e resultado para uma temperatura de referência de 30.0°C

WL=aT ² +bT+c		
a	0.00001205	WLReference@30°C (nm)
b	0.00910214	1541.560
c	1541.2762	

Este parâmetro WLReference@30°C é apresentado na folha de rosto da *Folha de Calibração*, como sendo o valor de comprimento de onda absoluto de referência para a temperatura de 30.0°C, devidamente arredondado ao picometro - rigor proveniente dos dados de variação de comprimento de onda, obtidos com o equipamento *BraggMETER FS4200*.

ii) Determinação dos coeficientes da aproximação polinomial de segunda ordem

Para a determinação da dependência da variação de comprimento de onda face à variação de temperatura, é necessário referenciar a variação de comprimento de onda ao comprimento de onda de referência medido a 30°C ($WL_{@30^{\circ}C}$), pelo que, partindo dos dados da tabela *Dados transformados para comprimento de onda absoluto*, executa-se:

$$\Delta WL_i = WL_i - WL_{ref\ 30^{\circ}C}, \quad (3.3)$$

- Sendo WL_i , o comprimento de onda absoluto do patamar i ;
- Sendo $WL_{ref\ 30^{\circ}C}$, o comprimento de onda calculado para a temperatura 30.0°C.

Tabela 3.10 — Cálculo para transformação em variação de comprimento de onda referenciado ao comprimento de onda medido a 30.0°C

T (°C)	$\Delta WL = WL_i - WL_{ref\ 30^{\circ}C}$
30.55	0.004158981
50.24	0.203020981
70.59	0.417579981
80.82	0.529257981
60.70	0.317062981
40.95	0.110729981
20.92	-0.087457019
0.95	-0.274030019
-19.49	-0.456242019
-9.70	-0.371533019
10.25	-0.190576019
30.44	0.001960981

É então aplicada a função *LINEST* (), que permite o cálculo da melhor equação que se ajusta aos dados seleccionados, usando o método dos mínimos quadrados (*least squares*), como se visualiza na tabela de resultados seguinte:

Tabela 3.11 — Aproximação polinomial de 2ª ordem

Sensitivity coefficients	
S2	-12.6315252
S1	102.3207878
S0	29.99243259
r2	0.999956473

Traduzindo-se então na equação, $T = -12.6\Delta\lambda^2 + 102.3\Delta\lambda + 30$, onde $\Delta\lambda$ representa a variação de comprimento de onda em relação ao valor de referência a 30°C e T a temperatura calculada, com a indicação do coeficiente de determinação r^2 , muito próximo do valor 1, indicando uma perfeita correlação na amostra, isto é, uma excelente confiança na aproximação de segunda ordem. Estes parâmetros da sensibilidade, também irão aparecer em forma de equação ou (fórmula de conversão), na folha de rosto da *Folha de Calibração*.

3.2.4.2 Sheet «error (FOS)»

Esta sub-folha de cálculo tem o objectivo de calcular o *Maximum Error FOS*, que se traduz na aferição da percentagem de erro de temperatura medida pelo sensor de temperatura em calibração e a temperatura medida efectivamente pelo padrão de temperatura, na gama de temperatura do processo de calibração.

A tabela seguinte esquematiza os passos para o seu cálculo:

Tabela 3.12 – Cálculo do erro FOS

DeltaWL= WLi- WLref30°C	Temperature (°C)		Error (%)	Maximum FOS Error
	Measured Value	Calculated Value		
0.004158981	30.55	30.41776433	0.13%	0.47%
0.203020981	50.24	50.24505919	0.00%	
0.417579981	70.59	70.51694776	0.07%	
0.529257981	80.82	80.60825897	0.21%	
0.317062981	60.70	61.16473283	0.47%	
0.110729981	40.95	41.16753474	0.22%	
-0.087457019	20.92	20.9471464	0.03%	
-0.274030019	0.95	1.004933007	0.06%	
-0.456242019	-19.49	-19.31994779	0.17%	
-0.371533019	-9.70	-9.766733688	0.07%	
-0.190576019	10.25	10.03377709	0.22%	
0.001960981	30.44	30.19303316	0.24%	
FOS				
100.31				

O cálculo do parâmetro *error FOS* é efectuado segundo as seguintes etapas:

i) Determinação de *Temperature (°C) Calculated Value*

Utilizando a equação gerada pela aproximação de segunda ordem, mencionada anteriormente, $T = -12.6\Delta\lambda^2 + 102.3\Delta\lambda + 30$, onde $\Delta\lambda$ representa a variação de comprimento de onda face ao valor de referência a 30 °C e T a temperatura calculada, efectua-se o cálculo da temperatura para cada patamar de temperatura do perfil submetido.

ii) Determinação de *Error (%)*

Com os dados de temperatura do perfil de temperatura, obtidos pelo padrão de temperatura - *Temperature (°C) Measured Value* e os valores de temperatura calculados - *Temperature (°C) Calculated Value*, a partir da equação de segunda ordem, efectua-se o cálculo em percentagem da diferença entre os dois valores de temperatura, para cada patamar, normalizado à gama de temperatura da calibração (FOS):

$$Error(\%) = \left| \frac{T_{i_{MeasuredValue}} - T_{i_{CalculatedValue}}}{FOS} \right| * 100, \quad (3.4)$$

Então, finalmente, selecciona-se o maior dos erros, entre todos os patamares. Este parâmetro também irá aparecer na folha de rosto da *Folha de Calibração*.

3.2.4.3 Sheet «error hysteresis»

Nesta sub-folha de cálculo, pretende-se aferir se a resposta do sensor de temperatura baseado em redes de Bragg apresenta uma histerese reduzida, isto é, espera-se que a tendência, em termos de variação de comprimento de onda, não dependa do estímulo de variação de temperatura a que o sensor foi submetido. O cálculo do parâmetro *hysteresis error* é efectuado segundo as seguintes etapas:

i) Determinação da aproximação de segunda ordem dos patamares ascendentes e descendentes de temperatura medidos

São seleccionados os valores medidos referenciados a 30.0°C e agrupados em dois conjuntos: os patamares cuja variação da temperatura é positiva e os patamares cuja variação da temperatura é negativa, assim como os respectivos valores do padrão de temperatura, como se visualiza na seguinte tabela:

Tabela 3.13 — Calculo aproximação segunda ordem patamares ascendentes e descendentes

Measured Values					
Descend		Ascend		Descend ($a \cdot x^2 + b \cdot x + c$)	
T (°C)	WL _i - WL _{ref} 30°C	T (°C)	WL _i - WL _{ref} 30°C	a	
80.82	0.53	30.55	0.00	b	0.000011218
60.70	0.32	50.24	0.20	c	0.009154746
40.95	0.11	70.59	0.42		-0.282580448
20.92	-0.09	80.82	0.53	Ascend ($a \cdot x^2 + b \cdot x + c$)	
0.95	-0.27	-19.49	-0.46	a	0.000012211
-19.49	-0.46	-9.70	-0.37	b	0.009081295
		10.25	-0.19	c	-0.284313126
		30.44	0.00		

Para cada um destes conjuntos é determinado o ajuste polinomial de segunda ordem, obtendo-se duas equações que traduzem a equação dos valores ascendentes e descendentes de temperatura, que irão ser utilizadas posteriormente.

ii) Determinação do máximo erro de histerese

É seleccionada a referência de variação de comprimento de onda correspondente ao máximo valor de temperatura submetido e colocado na 1ª célula da coluna denominada **WL(i)=WL(i-1)-0.1**, sendo os restantes valores referenciados ao anterior a menos da variação de 0.1 nm¹³. O propósito deste passo é criar valores de variação de comprimento de onda, em toda a gama de valores de temperatura, para se poder aplicar as equações dos ajustes polinomiais de segunda ordem ascendente e descendente, determinar a sua diferença e achar o respectivo erro em percentagem.

Tabela 3.14 – Calculo aproximação

WL(i)=WL(i-1)-0.1	Calculated Values			
	T (°C)			Error
	Descend	Ascend	Difference	
0.529257981	80.69935	80.80711	0.1077637	0.11%
0.429257981	71.49298	71.66905	0.1760697	0.18%
0.329257981	62.10637	62.33871	0.2323355	0.23%
0.229257981	52.5285	52.8034	0.2749068	0.27%
0.129257981	42.74716	43.04901	0.3018435	0.30%
0.029257981	32.74883	33.05968	0.3108558	0.31%
-0.070742019	22.51837	22.8176	0.2992225	0.30%
-0.170742019	12.03884	12.30253	0.2636848	0.26%
-0.270742019	1.291104	1.491411	0.2003072	0.20%
-0.370742019	-9.74655	-9.64226	0.1042927	0.10%
-0.470742019	-21.0989	-21.1292	0.0302677	0.03%

Assim, o máximo erro de histerese é o valor máximo encontrado na lista dos patamares calculados.

¹³ A sensibilidade teórica é de 9.78 pm/°C, pelo que, para termos variações de aproximadamente 10°C, a subtracção de 0.1 nm ou 100 pm corresponde a ter 11 pontos na gama de temperaturas usadas.

3.2.4.4 Sheet «Product sheet»

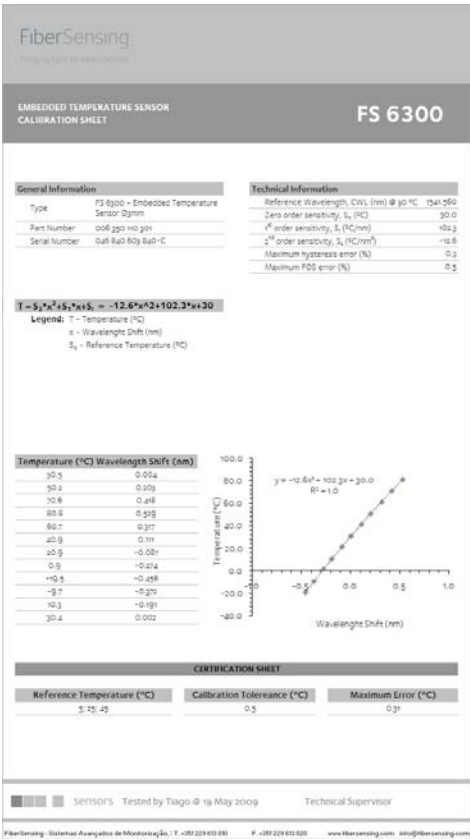


Figura 3.15 – Folha de Calibração de sensor de temperatura baseado em redes de Bragg.

Nesta sub-folha de cálculo (ver Figura 3.15) pretende-se resumir os parâmetros importantes da calibração, realçando-os graficamente e usando um interface gráfico apelativo, de consulta simples mas completo tecnicamente, de forma a transmitir ao utilizador confiança no sensor. A linguagem utilizada no documento *Folha de Calibração* é o Inglês.

A *Folha de Calibração*, na realidade é a congregação de dois documentos distintos:

1. *Calibration Sheet* – informação sobre a calibração;
2. *Certification Sheet* – informação sobre a validação de qualidade;

Os parâmetros e informações importantes apresentados na parte de *Calibration Sheet* são:

- *Name*, *Part Number* e *Serial Number* do sensor;
- Comprimento de onda de referência - *Reference Wavelength, CWL @ 30°C* (nm);
- Os coeficientes de sensibilidade separados por ordens polinomiais;
- O *Maximum Hysteresis Error* (%);
- O *Maximum FOS Error* (%);
- A equação polinomial de segunda ordem que permite a conversão de variação comprimento de onda referenciado ao valor de referência a 30 °C em temperatura absoluta;
- Tabela e gráfico dos dados do padrão de temperatura e resposta do sensor de temperatura que sustentam a calibração;

Os parâmetros e informações importantes apresentados na parte de *Certification Sheet* são:

- Valores dos patamares do perfil de temperatura do processo QuV ¹⁴ - *Reference Temperature* (°C);
- Tolerância da validação - *Calibration Tolerance* (°C);
- O valor do máximo erro de QuV - *Maximum Error* (°C).

3.2.5 Valores de validação de sensor temperatura

Os valores para validação da resposta do sensor de temperatura, da calibração e etapa de QuV são os descritos na seguinte tabela:

Tabela 3.15 — Valores validação sensor temperatura

Parâmetro <i>Calibration Sheet</i>	Valor
Maximum Hysteresis Error (%)	< 1 %
Maximum FOS Error (%)	< 1 %
Parâmetro <i>Certification Sheet</i>	Valor
Maximum QuV Error (°C)	0,5 °C

¹⁴ QuV significa Quality Validation. Para mais detalhes consultar tópico *Procedimento QuV (Quality Validation)*.

3.1.1 Levantamento de incertezas da medição

O levantamento de incertezas de medição é de extrema importância, uma vez que traduz a confiança nas medições efectuadas através dos equipamentos de medição que possuem determinado e conhecido rigor de medição, que não é infinito como se desejaria, introduzindo assim a sua fonte de incerteza.

«A incerteza da medição é um parâmetro associado ao resultado da medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos à grandeza sob medição» [6].

A entidade *European Association of Legislation* (EAL), uma referência europeia na definição de normas e standards, especifica que para a maioria dos trabalhos de calibração realizados [6], os laboratórios credenciados deverão mencionar a **incerteza expandida da medição** U , obtida pela multiplicação da **incerteza standard** $u(y)$ do **resultado estimado** y e pelo **factor de cobertura**¹⁵ k :

$$U = ku(y), \quad (3.5)$$

Portanto, a temática do levantamento das incertezas de medição implicitamente refere-se à incerteza expandida da medição.

Nos casos em que se pode considerar que a grandeza sob medição segue uma distribuição Gaussiana normal e que o valor associado à incerteza standard tem um aceitável valor de confiança, deve ser usado o factor de cobertura $k = 2$ na relação definida pela equação 3.5. Significa que a incerteza expandida corresponde a uma probabilidade de cobertura de aproximadamente 95%, perfeitamente ajustado para a maioria das necessidades de trabalhos de calibração.

Para aprofundar este tópico do levantamento da incerteza expandida da medição, apresenta-se a descrição dos seguintes temas: **i) classificação das fontes de incerteza;** **ii) abordagem aos conceitos associados aos tipos de distribuição de probabilidade dos componentes de incerteza;**

i) Classificação das fontes de incerteza

As fontes típicas de incerteza de uma medição são:

- Amostragem;
- Incertezas das massas e materiais volumétricos;
- Incertezas devidas às condições ambientais;
- Pureza dos reagentes;
- Incertezas de medição dos equipamentos;

¹⁵ Factor de cobertura é a tradução de *coverage factor*.

Os componentes da incerteza de medição são classificados como *Tipo A* e *Tipo B*.

Incerteza Tipo A:

- Cálculo do desvio padrão para uma série de observações independentes. Registo do cálculo da média e do desvio padrão;
- Utilização do método dos mínimos quadrados (*least squares*) para ajustar uma curva de dados, para estimar os parâmetros da curva e seu desvio padrão;
- Identificar e quantificar efeitos aleatórios em certos tipos de medições. Análise de variância;
- Equação para cálculo da incerteza de medição $u(x_i)$ Tipo A:

$$u(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}, \quad (3.6)$$

Sendo x_i as estimativas da medição, $s(x_i)$ o desvio padrão e n o tamanho da amostra.

Incerteza Tipo B:

- Dados de medições anteriores;
- Experiência ou conhecimento geral do comportamento dos equipamentos;
- Especificações do fabricante;
- Dados provenientes de calibrações ou outros certificados;
- Equação para cálculo da incerteza de medição U Tipo B:

$$U = k\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}, \quad (3.7)$$

Sendo k o factor de cobertura e $u_{1,2,\dots,n}$ as incertezas contributivas. Esta equação é análoga à equação 3.6.

ii) Distribuição de Probabilidades dos Componentes de Incerteza

Indica a probabilidade da forma como um componente de medição está distribuído e depende da natureza do componente.

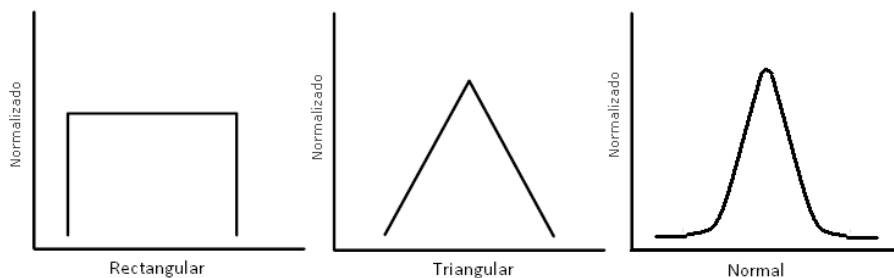


Figura 3.16 – Tipos de distribuição de probabilidades: rectangular, triangular e normal.

No caso da calibração de sensores de temperatura, estamos perante a incerteza de leitura dos equipamentos, do tipo B.

A **Distribuição Rectangular** aplica-se:

- Quando não se tem informação sobre a natureza do componente;
- Para leitura de equipamentos digitais;
- Para variações de volume devido à diferença de temperatura;
- Para exactidão declarada dos equipamentos;

É feita uma estimativa sob a forma de uma gama máxima $\pm a$, sendo x_i as estimativas da medição:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (3.8)$$

A **Distribuição Triangular** aplica-se:

- Para equipamentos e instrumentos calibrados;
- Para leitura em equipamentos analógicos.
- Valores próximos da média são mais prováveis do que próximos dos limites;

É feita uma estimativa sob a forma de uma gama máxima $\pm a$, descrita por uma distribuição simétrica, sendo x_i as estimativas da medição:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}, \quad (3.9)$$

A **Distribuição Normal** aplica-se quando está declarada no certificado de calibração. A incerteza vem acompanhada de um intervalo de confiança, assim temos o factor para transformar a incerteza combinada e expandida ($x \pm c$) para uma probabilidade de cobertura (ou confiança) de 95%:

$$u(x_i) = \frac{c}{2}, \quad (3.10)$$

A **Distribuição *t-student***, considera para uma amostra aleatória de tamanho n , traçada de uma população normal com média μ e um desvio padrão σ , sendo $\bar{x}$ a amostra média e s o desvio padrão da amostra, o valor dado por:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}}, \quad (3.11)$$

Corresponde a uma distribuição t com $n-1$ graus de liberdade. Quanto maior for o grau de liberdade, mais a densidade t se aproxima da densidade normal.

Isto reflecte o facto do desvio padrão da amostra s se aproximar do desvio padrão σ para valores elevados do tamanho da amostra n .

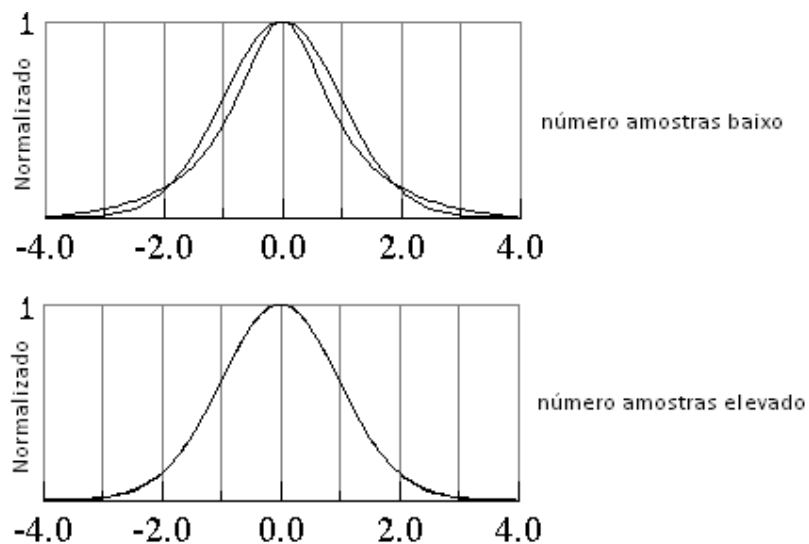


Figura 3.17 – Distribuição *t-student*.

Com base nas abordagens mencionadas, a incerteza expandida calculada é de $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ para os sensores de temperatura baseados em redes de Bragg, calibrados com padrão secundário de temperatura PRT (5608) e equipamento de medição digital (1502A), com a unidade de medição de comprimento de onda *BraggMETER FS4200*, no sistema de calibração baseado em câmara de ciclos térmicos. Os detalhes dos cálculos são apresentados no anexo 4 [6] [7]. Deste modo, para uma medição realizada com um sensor de temperatura baseado em redes Bragg calibrado com os equipamentos mencionados, por exemplo, de 23.55°C , tem associado uma incerteza expandida de $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondendo assim à apresentação de $23.55 \pm 0.49^{\circ}\text{C}$.

3.3 - Sistema de calibração FSBlockCalibrator

Nesta secção é apresentado o protótipo para um novo calibrador de temperatura de sensores baseados em redes de Bragg, denominado por FSBlockCalibrator¹⁶. Optou-se pela construção de um sistema, uma vez que as soluções de mercado não têm prevista a continuidade da fibra óptica após o sensor. Também se considerou a possibilidade de alteração do bloco num equipamento standard, como o referido anteriormente, do fabricante *Ametek*, mas tal estratégia não foi seguida, uma vez que existe risco de não ser possível tecnicamente essa alteração e o custo associado é elevado para essa restrição.

A motivação para o desenvolvimento deste sistema de calibração, prende-se principalmente por cinco grandes requisitos a enunciar:

- **Velocidade de variação do valor padrão de temperatura** – o actual sistema limita os patamares de temperatura a 1 hora, o que representa 12 horas de calibração;
- **Rigor e uniformidade volumétricos** – o actual sistema apresenta valores de flutuação de temperatura (temporal) e valor de variação de temperatura (espacial) consideráveis;
- **Consumo energético** – o actual sistema consome recursos energéticos elevados;
- **Temperatura mínima estável de -20 °C;**
- **Possibilidade de continuidade de fibra óptica, após a estrutura FBG.**

No entanto, pretende-se manter as excelentes características que o actual sistema possui:

- **A flexibilidade de definição de patamares de temperatura** – desenvolvimento de aplicação para interface gráfico e gravação de perfis de temperatura com interface com hardware de potência;
- **A eficiência** – sistema robusto com gestão de falhas e decisão;
- **A flexibilidade** - de adaptação a diferentes tamanhos e encapsulamentos de sensores;
- **Compatibilidade com procedimentos standards** – possibilidade e flexibilidade de ajuste para diferentes procedimentos de calibração;

¹⁶ FSBlockCalibrator, significa *FiberSensing Block Calibrator*.

3.1.2 Tecnologia base para o sistema protótipo

A construção do sistema protótipo é baseado em elementos Peltier que permitem o aquecimento/arrefecimento nas suas faces, e arrefecimento/aquecimento nessas mesmas faces, se houver alteração no sentido da corrente eléctrica aos terminais do elemento Peltier.

O conceito associado a este dispositivo é o efeito Peltier, que resumidamente, consiste na aplicação de uma tensão eléctrica e consequente corrente eléctrica por um circuito eléctrico fechado composto por duas junções de dois condutores ou semicondutores, compostos de materiais diferentes, produzindo um gradiente de temperatura nessas duas junções.

O elemento Peltier utilizado para o desenvolvimento do protótipo é da marca *Marlow Industries, Inc.*, modelo RC12-8L. Foi escolhido por apresentar características de gradiente de temperatura elevado.

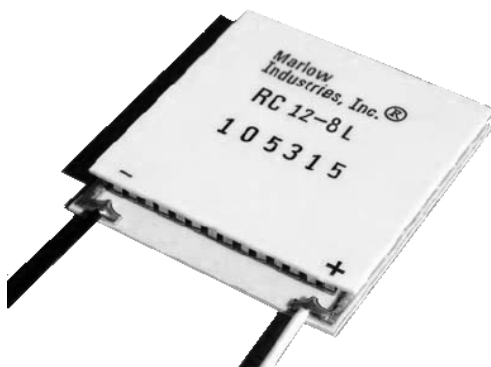


Figura 3.18 - Elemento protótipo: Peltier RC12-8L.

Os valores principais da performance do elemento Peltier utilizado são:

Tabela 3.16 — Valores validação sensor temperatura

Temperatura na face quente	27°C	50°C
ΔT max (arrefecido em hidrogénio seco)	66 °C	74 °C
Q max	71 Watt	78 Watt
I max	7.4 Ampere	7.4 Ampere
V max	14.7 Volt DC	16.4 Volt DC

3.1.3 Desenvolvimento FSBlockCalibrator protótipo nº1

A concretização do protótipo para o sistema de calibração FSBlockCalibrator teve como base todos os requisitos anunciados anteriormente. A Figura 3.19 mostra o modelo projectado.

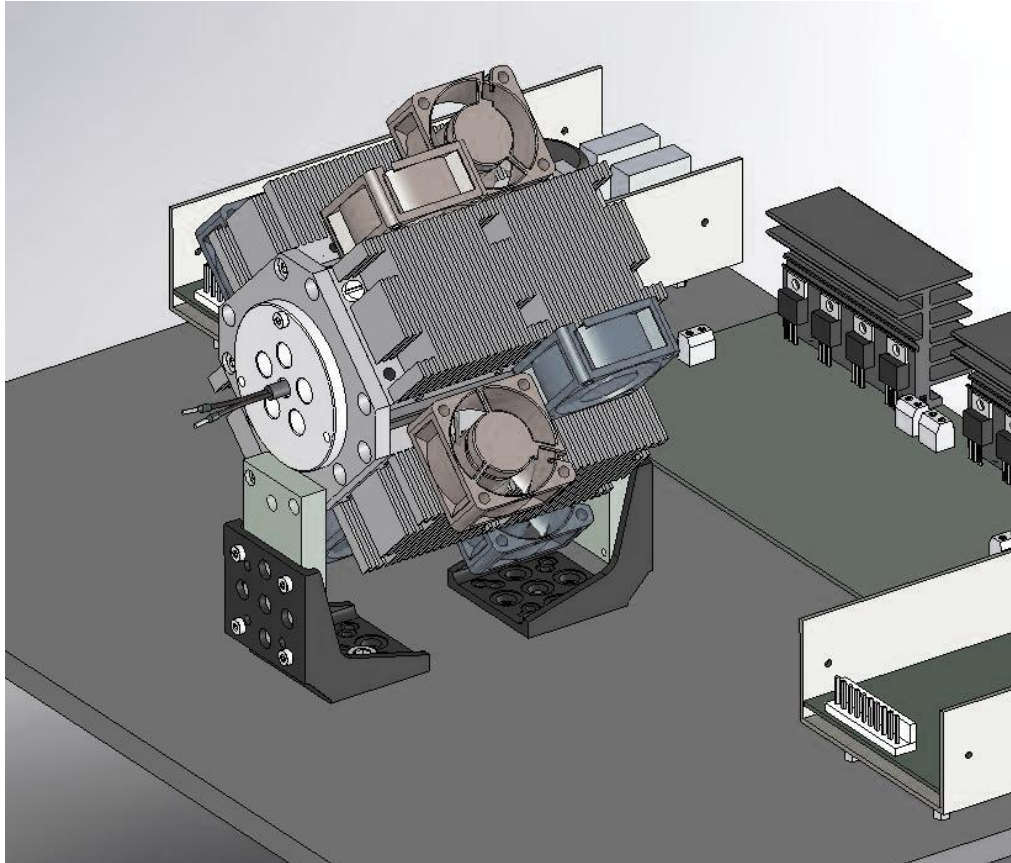


Figura 3.19 - Desenho do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº 1.

De salientar a escolha da geometria cilíndrica, fundamental para a uniformização da temperatura, no interior do bloco do calibrador, em contacto directo com os sensores, que permite a entrada e saída da fibra óptica acoplada ao sensor, de modo a ser possível realizar ligações ópticas entre sensores. Para o aquecimento/arrefecimento do interior cilíndrico, optou-se pela geometria exterior de um paralelepípedo, para a possibilidade de montagem de um conjunto de 8 elementos Peltier. Por cada uma das faces, existe um dissipador ventilado por duas ventoinhas, para cada subconjunto de dois elementos Peltier ligados electricamente em série entre si. A Figura 3.20 e a Figura 3.21 mostram detalhes da construção do sistema.

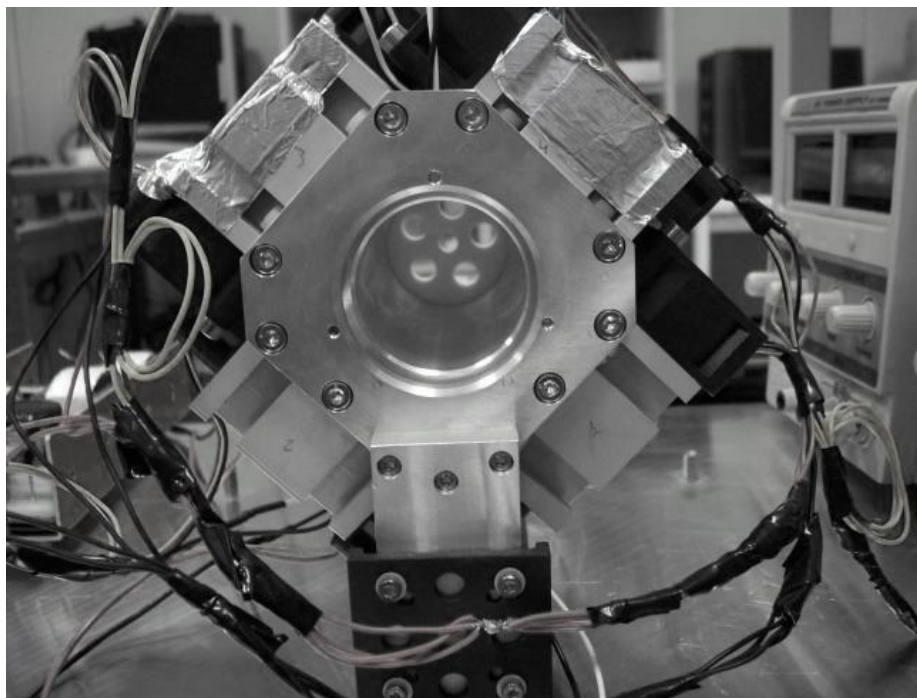


Figura 3.20 – Fotografia do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº 1.



Figura 3.21 – Detalhe cilindro interno do sistema calibração FSBlockCalibrator protótipo nº1.

3.1.4 Ensaios experimentais - validação do protótipo

Para a validação do protótipo projectado baseado em elementos Peltier foram executados ensaios experimentais. Os seguintes tópicos fazem uma descrição de cada ensaio, seus resultados, conclusões e dúvidas que surgiram e deram a base para a realização dos ensaios experimentais seguintes.

3.1.4.1 Ensaio 1

Objectivo: ensaio de comportamento de gama de temperatura (máxima e mínima) com o protótipo nº1 do FSBlockCalibrator.

Equipamento: protótipo nº1 do sistema de calibração FSBlockCalibrator composto por oito elementos Peltier RC12-8L, ponta de prova do sensor padrão secundário de temperatura *PRT* (5608), medidor digital (1502A), bloco de alumínio cilíndrico com entrada para a ponta de prova, quatro fontes tensão DC regulável, oito ventiladores acoplados aos dissipadores de alumínio.

Montagem: protótipo nº1 do sistema de calibração FSBlockCalibrator, ponta de prova de padrão secundário de temperatura inserida no cilindro interior do calibrador. Cada conjunto de dois Peltier em série eléctrica, ligada electricamente a uma fonte tensão DC, perfazendo um total de quatro. Os oito ventiladores são alimentados através de uma fonte tensão DC. A Figura 3.22 esquematiza a montagem efectuada.

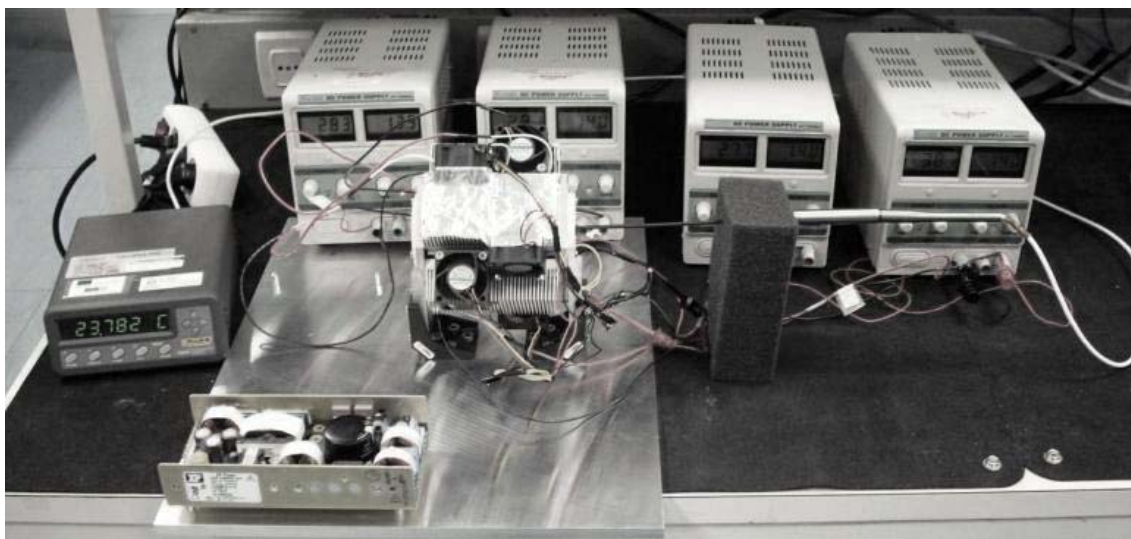


Figura 3.22 - Montagem ensaio 1: protótipo 1 do FSBlockCalibrator.

Resultados:

Foram aferidos experimentalmente a temperatura mínima e máxima do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº1. No anexo 3, apresenta-se uma tabela com os dados experimentais obtidos, assim como o procedimento e sequência de ações realizadas.

Em resumo, obteve-se os seguintes resultados.

Temperatura mínima aferida: 5.71 °C;

Tempo de estabilização: [25.44;6.57] °C: 12 min;

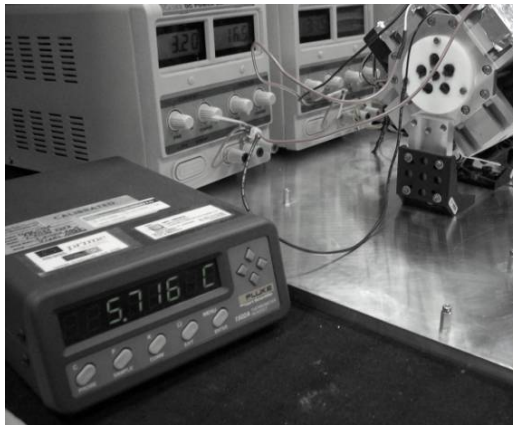


Figura 3.23 - Ensaio na aferição da temperatura mínima: protótipo nº1 do FSBlockCalibrator.

Temperatura máxima aferida: 105.68 °C;

Tempo de estabilização: [5.7;105.17] °C: 25 min;



Figura 3.24 - Ensaio na aferição da temperatura máxima: protótipo nº1 do FSBlockCalibrator.

Gráfico com o perfil de temperatura obtido:

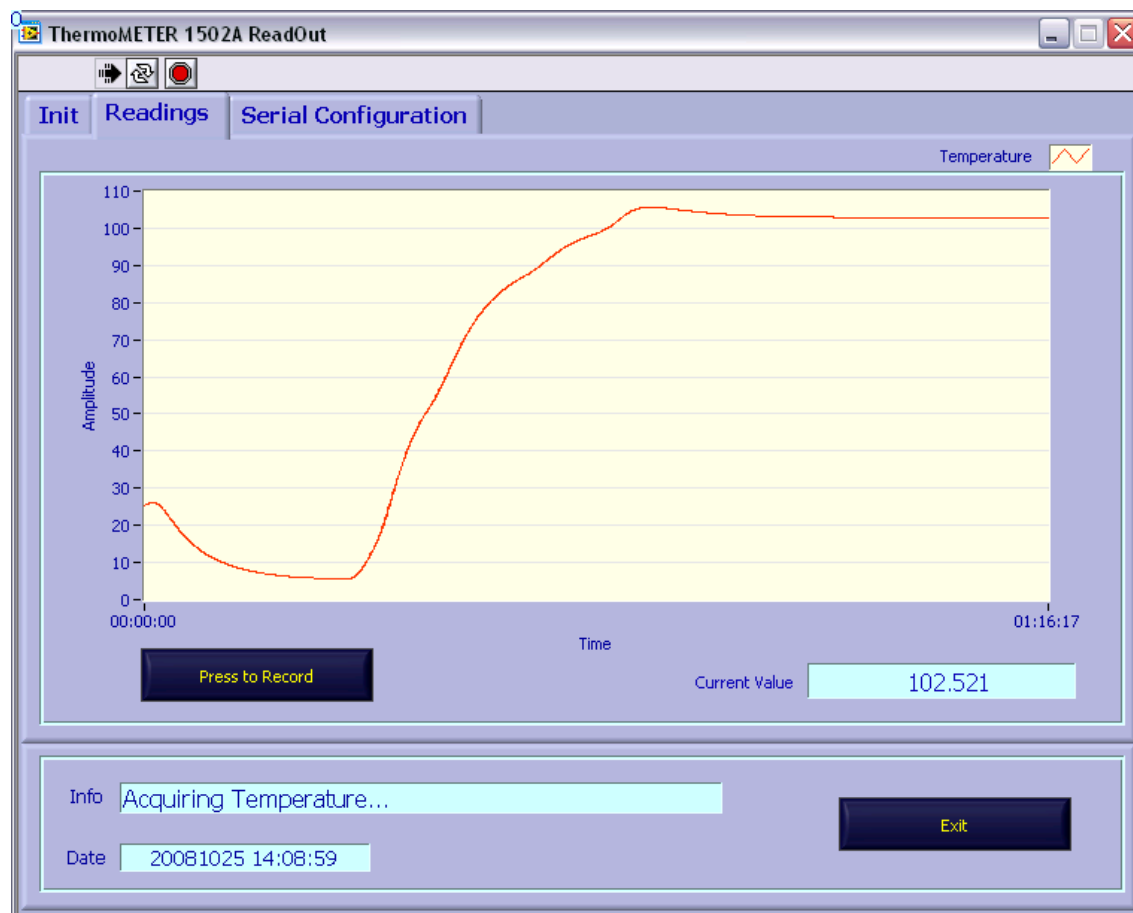


Figura 3.25 – Gráfico de temperatura (°C) do ensaio 1.

Conclusões:

- Os resultados obtidos não cumprem o requisito de temperatura mínima estável de -20°C , ficando-se apenas pelos 5.71°C .
- Existe falta de isolamento térmico com a temperatura ambiente – utilização de teflon ou poliuretano para isolamento mais eficaz;
- A ventilação melhora o desempenho, mas não permite verdadeiramente arrefecer a face quente dos elementos Peltier. Necessita-se de uma solução com ventilação mais eficiente, passando pela utilização de coolers de CPU de computadores e/ou pela utilização de cascatas de elementos Peltier.

3.1.4.2 Ensaio 2

Objectivo: na sequência de conclusões e sugestões de alterações, provenientes do ensaio anterior, irá ser ensaiada a solução de utilização de um cooler de CPU, para aumentar a capacidade arrefecimento. Irá ser aferida a temperatura mínima utilizando um elemento Peltier, medindo a temperatura no bloco alumínio, a 5 mm distância da face fria do elemento Peltier.

Equipamento: elemento Peltier RC12-8L, *ponta de prova PRT (Probe 5608)*, *medidor digital (1502A)*, bloco de alumínio com entrada para a ponta de prova; duas Fontes tensão DC reguláveis, um cooler de CPU;

Montagem: placa de plástico para suporte + bloco de alumínio + *ponta de prova PRT* + elemento Peltier com massa térmica nas duas faces + cooler de CPU

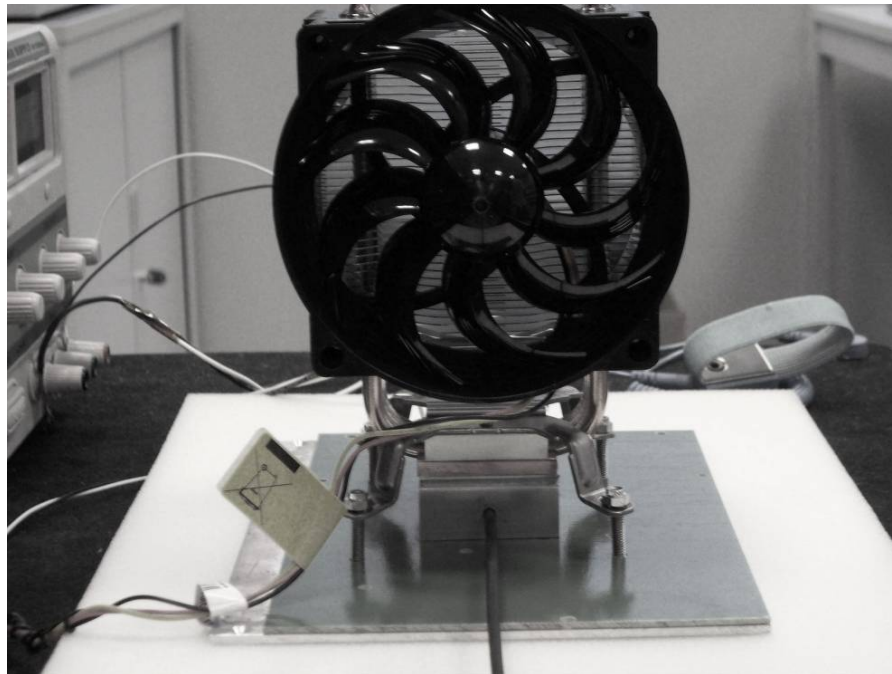


Figura 3.26 - Montagem do ensaio 2.

Resultados:

Temperatura mínima aferida: -12.2 °C;

Tempo de estabilização: [17.93 ; -11.0] °C: 3 minutos;

Fonte tensão DC para Peltier: 11.7V @ 5.45A

Fonte tensão DC para ventilador cooler: 13.9V @ 0.56A

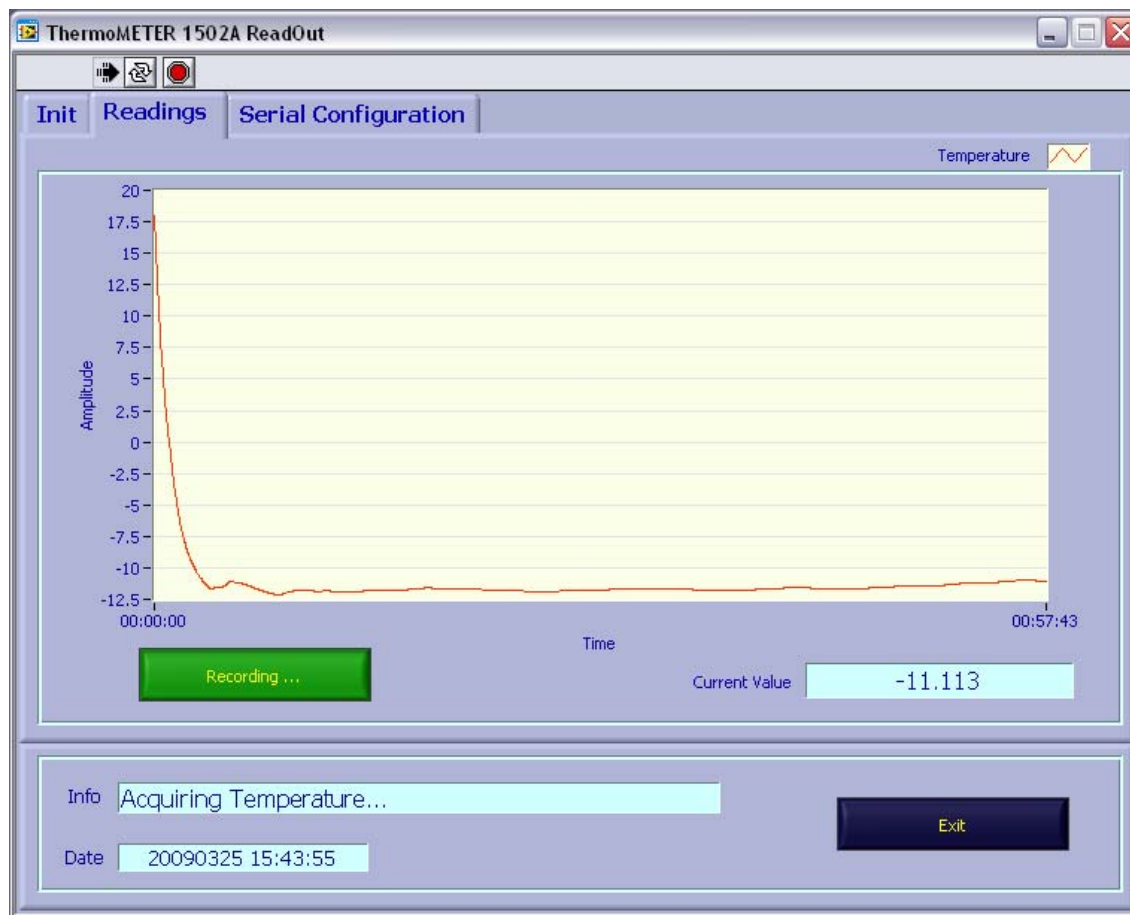


Figura 3.27 – Gráfico de temperatura (°C) ensaio 2.

Conclusão: resultado não cumpre o requisito de temperatura mínima estável de - 20°C, mas a utilização de um cooler de CPU revelou-se muito eficiente.

3.1.4.3 Ensaio 3

Objectivo: na sequência de conclusões e sugestões de alterações, provenientes dos ensaios anteriores, foi ensaiada a solução de utilização de cascata de dois elementos Peltier. Foi aferida a temperatura mínima, medida no bloco alumínio, a 5 mm distância da face fria do elemento Peltier inferior.

Equipamento: dois elementos Peltier RC12-8L, ponta de prova PRT (*Probe 5608*), medidor digital (*1502A*), bloco de alumínio com entrada para a ponta de prova; três Fontes de tensão DC regulável, um ventilador do tipo cooler de CPU;

Montagem: placa de plástico para suporte + bloco de alumínio + *ponta de prova PRT (Probe 5608)* + elemento Peltier 1 com massa térmica nas duas faces + elemento Peltier 2 com massa térmica nas duas faces + cooler de CPU. As fontes DC ajustadas de modo a que a face quente do Peltier inferior deva estar em contacto térmico com a face fria do Peltier superior, de modo a que se consiga a extracção eficiente do calor da face quente do elemento Peltier inferior. Assim desta forma, consegue-se atingir temperaturas mais baixas, na face fria do elemento inferior, que está em contacto com o bloco de alumínio.

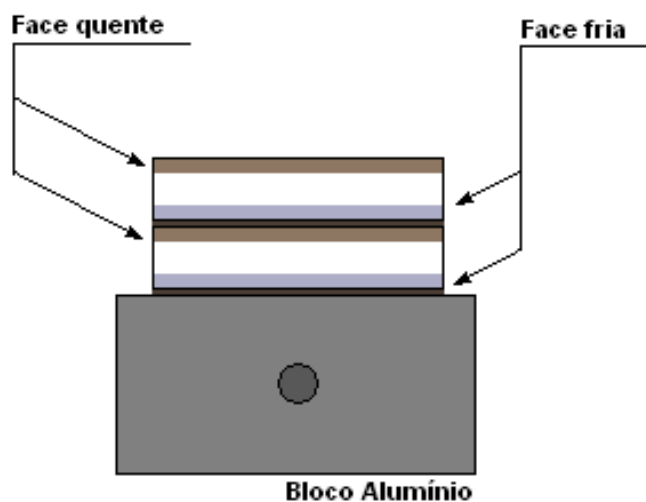


Figura 3.28 – Detalhe de montagem da cascata de dois elementos Peltier do ensaio 3.

Resultados:

Temperatura mínima aferida: -18.6 °C;

Tempo de estabilização: --- ;

Fonte tensão DC para Peltier inferior: 5.9V @ 3.04A

Fonte tensão DC para Peltier superior: 10V @ 5A

Fonte tensão DC para ventilador cooler: 13.9V @ 0.56A

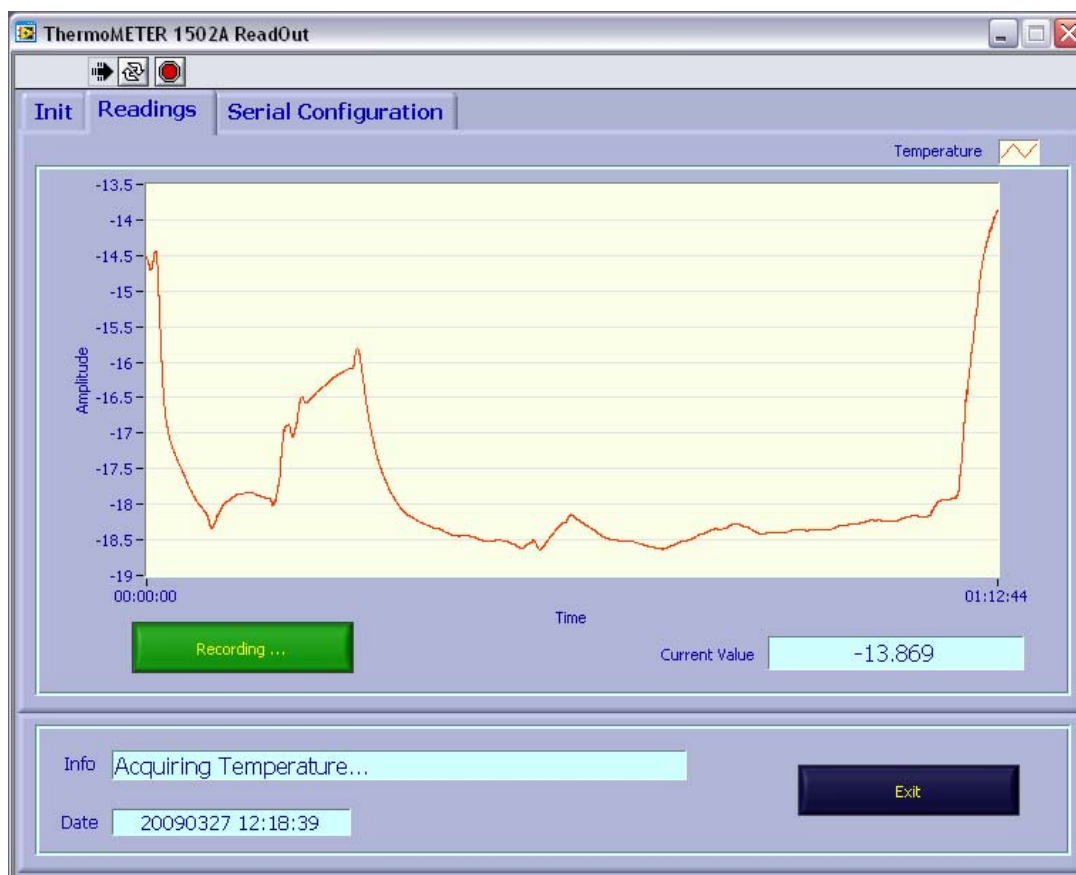


Figura 3.29 - Gráfico temperatura (°C) ensaio 3.

Conclusões:

- Resultado não cumpre o requisito de temperatura mínima estável de -20°C , mas a utilização de cascata de dois elementos Peltier revelou-se eficiente, em conjunto com a utilização de cooler de CPU.
- O ajuste do valor de corrente a aplicar, através das fontes de tensão DC, aos elementos Peltier, deverá de respeitar um compromisso entre si, de modo a que, o elemento Peltier superior, que é utilizado para arrefecer a face quente do elemento inferior, tenha aplicada uma corrente consideravelmente superior à corrente do elemento inferior, isto é, tenha uma capacidade de extracção de calor superior. No ensaio, determina-se que seja utilizada no Peltier inferior, aproximadamente 35% da potência usada no Peltier superior. A justificação deste facto prende-se ao facto de o elemento superior ter um maior gradiente de temperatura a manter que o elemento inferior, uma vez que a temperatura da face quente do elemento inferior é muito mais elevada que a correspondente no elemento inferior. Ao utilizar-se a mesma capacidade de arrefecimento nos dois elementos, o sistema diverge, uma vez que o elemento inferior está a gerar calor numa quantidade tal que o elemento superior não consegue dissipar, como se constata pelos primeiros ajustes do gráfico com o perfil de temperatura apresentados na Figura 3.29.

3.1.4.4 Ensaio 4

Objectivo: aferição da temperatura mínima utilizando um Peltier com protecção térmica em volta do bloco de alumínio e realizando a medida da temperatura, no bloco alumínio, a 5 mm distância da face fria do elemento Peltier.

Equipamento: elemento Peltier RC12-8L, ponta de prova *PRT*, medidor digital (1502A), bloco de alumínio com entrada para a ponta de prova; duas fontes tensão DC reguláveis, cooler de CPU, isolador de protecção térmica;

Montagem: placa de plástico para suporte + bloco de alumínio + *ponta de prova* + elemento Peltier com massa térmica nas duas faces + esponja de protecção térmica + cooler de CPU.

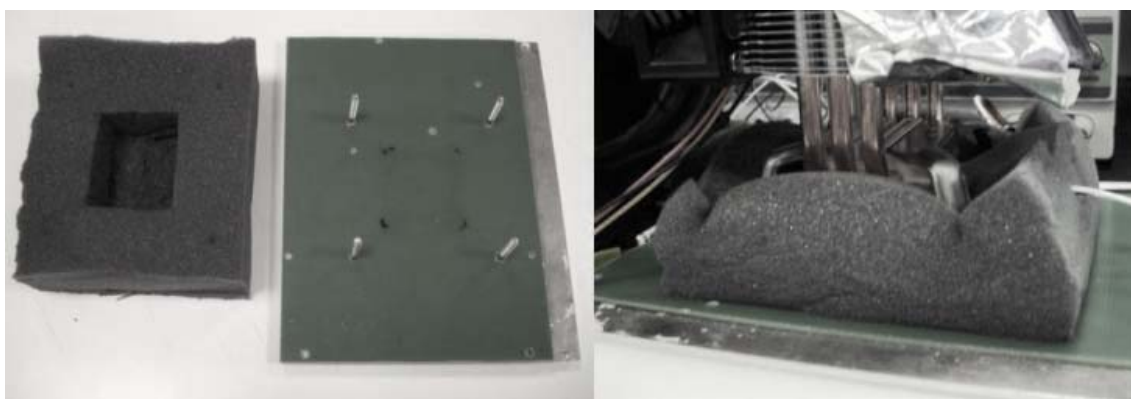


Figura 3.30 – Montagem ensaio 4: elemento Peltier com isolador de protecção térmica bloco alumínio.

Resultados:

Temperatura mínima aferida: -24.0 °C;

Tempo de estabilização: [19.02; -22.45] °C: 6 min;

Fonte tensão DC para Peltier: 11.1V @ 4.99A

Fonte tensão DC para ventilador cooler: 13.9V @ 0.56A

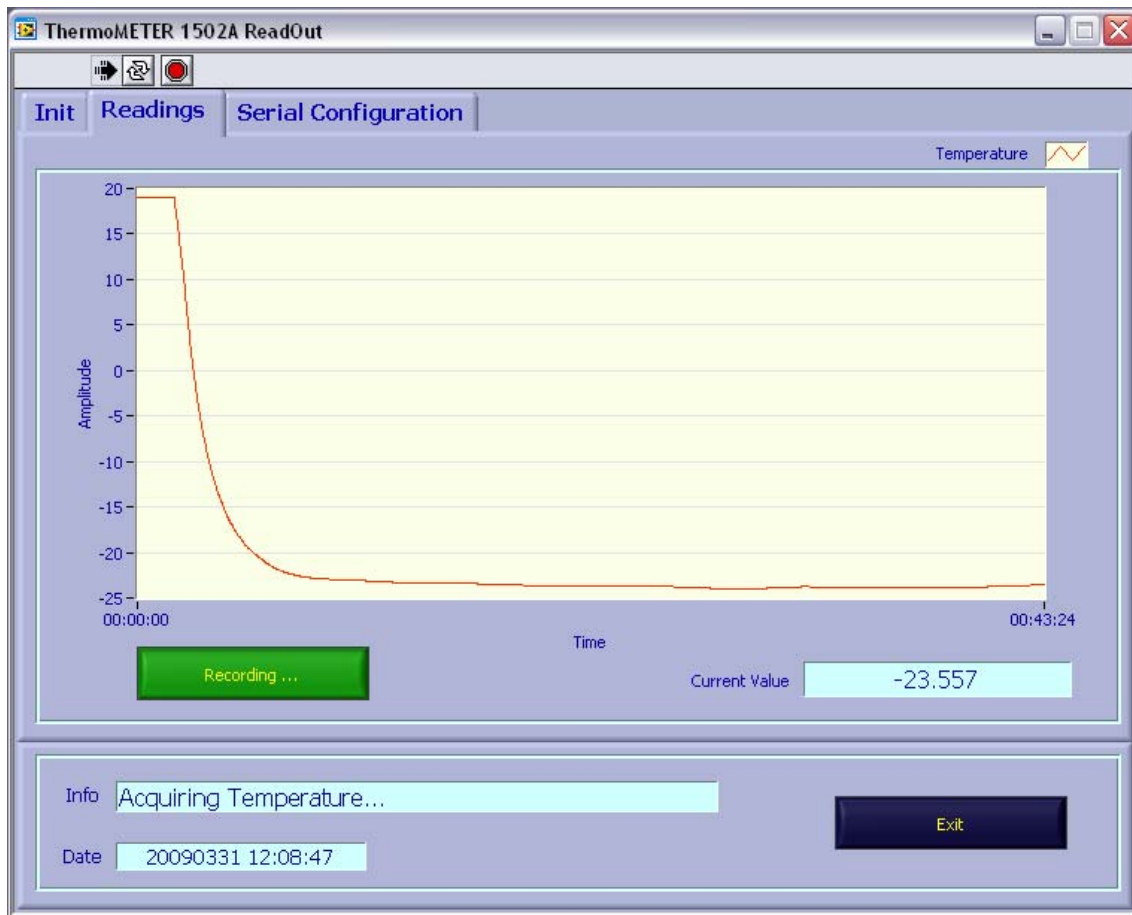


Figura 3.31 - Gráfico temperatura (°C) ensaio 4.

Conclusões:

- O resultado cumpre o requisito de temperatura mínima estável de -20°C , no entanto, a massa a arrefecer é pequena em comparação com a estrutura cilíndrica que se pretende aplicar, embora nessa configuração se utilizem mais elementos Peltier, a margem obtida é insuficiente para se ter -20°C estáveis.

3.1.4.5 Ensaio 5

Objectivo: aferição da temperatura mínima utilizando dois Peltier em cascata com protecção térmica em volta do bloco de alumínio e realizando a medida da temperatura, no bloco alumínio, a 5 mm distância da face fria do elemento Peltier inferior e um ventilador adicional.

Equipamento: dois elementos Peltier RC12-8L, ponta de prova *PRT (Probe 5608)*, medidor digital (1502A), bloco de alumínio com entrada para a ponta de prova, três fontes tensão DC regulável, cooler de CPU, isolador de protecção térmica, ventilador.

Montagem: placa de plástico para suporte + bloco de alumínio + ponta de prova + elemento Peltier 1 com massa térmica nas duas faces + elemento Peltier 2 com massa térmica nas duas faces + isolador de protecção térmica + cooler de CPU + ventilador. As fontes DC ajustadas de modo a que a face quente do Peltier inferior deva estar em contacto térmico com a face fria do Peltier superior, de modo a que se consiga a extracção de calor da face quente do elemento Peltier inferior. Assim desta forma, consegue-se atingir temperaturas menores na face fria do elemento inferior (contacto com o bloco de alumínio). Adicionalmente colocou-se um ventilador para aumentar o fluxo de ar no cooler de CPU.



Figura 3.32 – Montagem ensaio 5: dois elementos Peltier com isolador para protecção térmica bloco alumínio e ventilador adicional.

Resultados:

Temperatura mínima aferida: -34.1 °C;

Tempo de estabilização: [21.54; -31.55] °C: 8 min;

Fonte tensão DC para Peltier inferior: 5.9V @ 3.06A

Fonte tensão DC para Peltier superior: 10.4V @ 5.14A

Fonte tensão DC para dois ventiladores cooler: 13.9V @ 1.2A

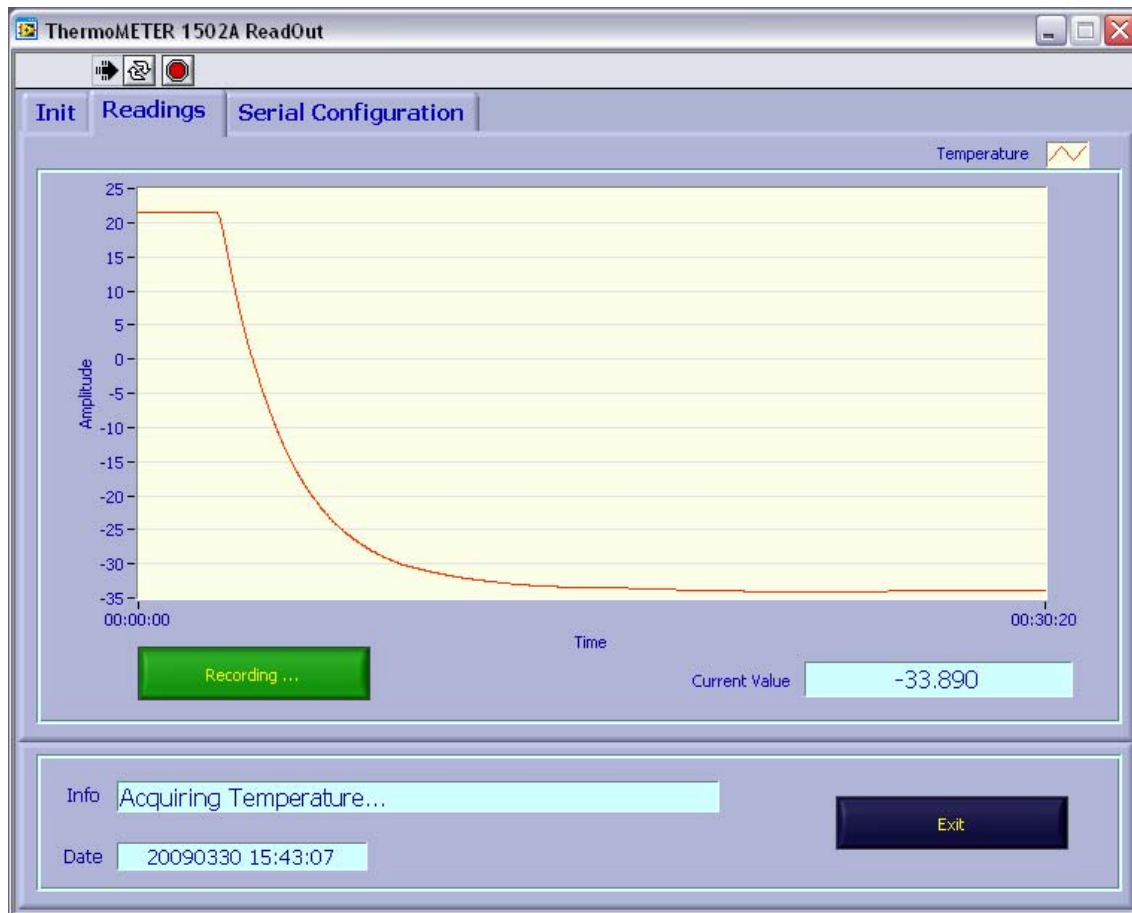


Figura 3.33 - Gráfico temperatura (°C) ensaio 5.

Conclusões:

- O resultado cumpre claramente o requisito de temperatura mínima estável de - 20°C;
- O isolador de protecção térmica revela-se fundamental para que a influência da temperatura ambiente seja minimizada. Numa versão avançada, o teflon e o poliuretano são opções de materiais a considerar;
- O ventilador adicional melhora a dissipação do cooler, como seria de esperar.

3.1.5 Conclusões ensaios experimentais FSBlockCalibrator protótipo nº1

O protótipo inicial não cumpre o requisito de temperatura mínima estável de -20°C. Pelos ensaios realizados, este desempenho deficitário deve-se ao excessivo gradiente de temperatura, entre a temperatura ambiente e a temperatura mínima pretendida, no interior do corpo cilíndrico. Para minimizar este efeito excessivo de gradiente de temperatura, será necessário realizar as seguintes intervenções:

- i) **Melhoramento substancial, do isolamento térmico do corpo interior cilíndrico e o exterior meio ambiente;**
- ii) **Melhoramento substancial da capacidade de ventilação - arrefecimento - da face quente do conjunto de Peltier.**

3.1.6 Modelo do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº2

Com base nas conclusões e aprendizagem provenientes dos desenvolvimentos e ensaios do protótipo nº1, aponta-se os seguintes tópicos para a resolução das causas que impossibilitam o critério de temperatura mínima:

- i) **Melhoramento substancial do isolamento térmico do corpo interior cilíndrico e o exterior meio ambiente.** Para a sua resolução, necessita-se de uma revisão e novo dimensionamento dos componentes do bloco calibrador, de modo a que o corpo cilíndrico seja envolvido externamente com material termicamente isolante – espuma em **poliuretano ou teflon**, com uma espessura considerável (1.5 – 2 cm), para garantir um excelente isolamento do meio ambiente. A vantagem da escolha do poliuretano reside na sua impermeabilidade ao efeito da condensação. Como desvantagem, aponta-se a dificuldade de execução na sua aplicação. A vantagem da escolha do teflon reside na facilidade da sua montagem, em partes convenientemente desenhadas e produzidas para a sua aplicação.
- ii) **Melhoramento substancial da capacidade de ventilação - arrefecimento - da face quente do conjunto de Peltier.** Para a sua concretização, o recurso a cooler de processadores de computadores é a melhor opção, face ao convencional dissipador passivo.

A Figura 3.34 congrega num modelo gráfico base, as principais alterações e inovações a realizar no protótipo, tendo em vista os requisitos iniciais propostos e as melhorias de isolamento térmico e ventilação, mencionadas anteriormente, assim como a possibilidade de utilização de cascata de elementos Peltier.

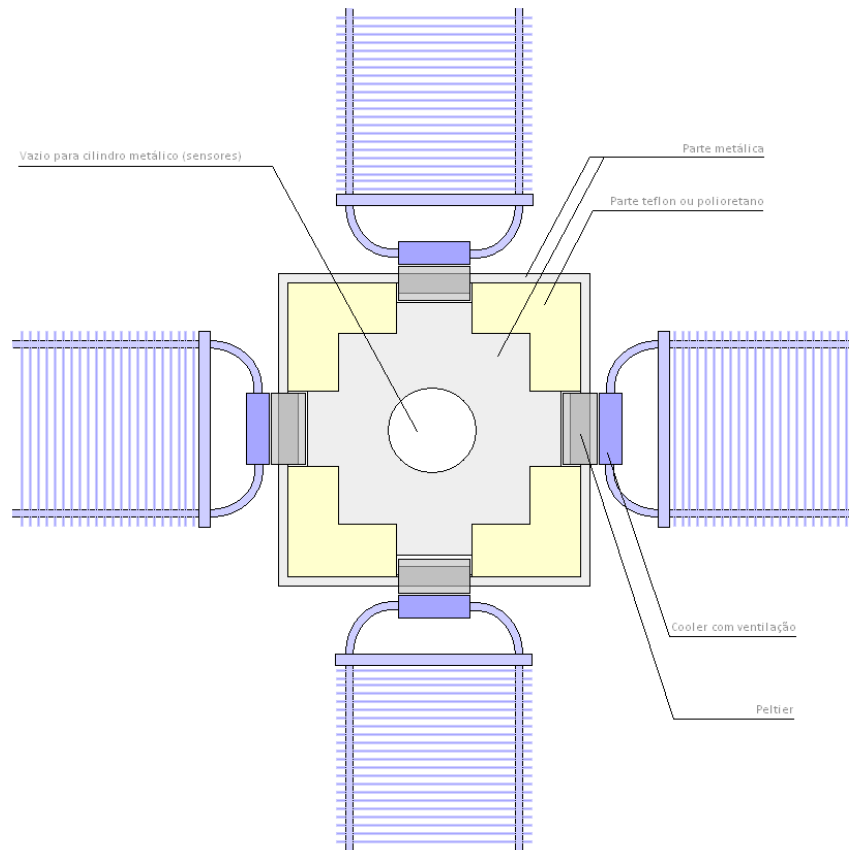


Figura 3.34 – Desenho base para sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº 2.

Adicionalmente, apresenta-se na Figura 3.35, um diagrama funcional do sistema de calibração FSBlockCalibrator completo:

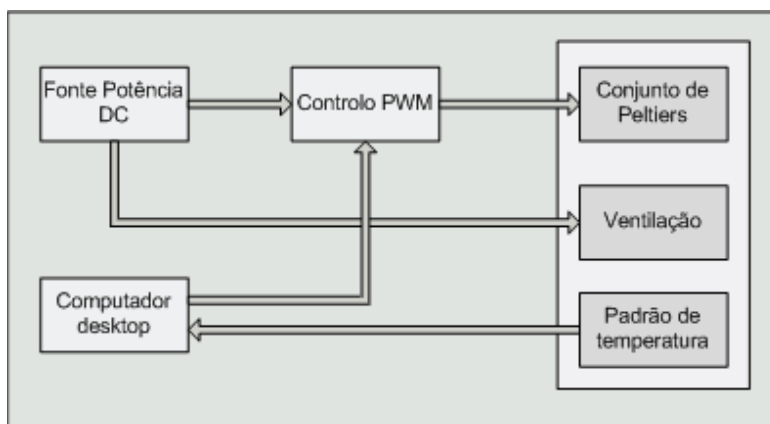


Figura 3.35 - Diagrama funcional do sistema de calibração FSBlockCalibrator.

Os conjuntos de elementos Peltier são alimentados por tensão DC (fonte potência DC), via PWM – modulação por largura de pulso – de modo a variar o valor da transferência de potência entregue aos elementos, para deste modo, haver um controle rigoroso da temperatura do sistema. A aplicação residente no computador desktop, permite a gestão do controle PWM aplicado aos elementos Peltier, através da realimentação disponível através da medição da temperatura via o equipamento de padrão de temperatura *medidor digital (1502A)* e ponta de prova *PRT (5608)*. A potência entregue à ventilação é fornecida via uma fonte de tensão DC.

Capítulo 4

Análise estatística dos resultados

4.1 - Introdução

É em ambiente produtivo, que determinado produto é fabricado, produzido ou transformado em massa ou em série, existindo processos inerentes à sua fabricação. A calibração do sensor de temperatura baseado em redes de Bragg faz assim parte integrante do processo de fabrico. Com base no controlo estatístico dos processos é possível refinar e controlar o processo produtivo e de calibração, por meio da identificação das diferentes fontes de variabilidade do processo. Utilizando conceitos de estatística procura-se separar os efeitos dessa variabilidade causada por causas comuns - causas inerentes à natureza do processo produtivo, e das causas especiais - causas provenientes da influência de variáveis específicas e controláveis sobre o processo.

De modo a obter-se uma fasquia elevada de qualidade de produto, torna-se imperativa a utilização frequente da análise da capacidade do processo, que dá indicação da capacidade do processo poder produzir ou fabricar produtos dentro de uma gama ou limites de especificação, com os desvios devidamente controlados e com a identificação e o conhecimento das suas causas.

Resumidamente, o controlo estatístico é conseguido através da concretização dos seguintes aspectos:

- i) **Controlo estatístico do processo** - verificação: recolha de dados de produção de determinado produto, verificando-se eventualmente a existência de causas especiais que influenciam o processo em questão, devendo-se identificá-las e tentar atenuar ou mesmo eliminar a sua influência no processo, até que o processo se encontre sobre um controlo estatístico. Esta análise efectua-se com a consulta de gráficos de modo a permitir-se a análise da distribuição dos dados.

ii) **Índices capacidade** - avaliação: após se garantir o controlo estatístico do processo, efectua-se uma identificação de todos os dados que compõem o período sobre controlo do processo. Estes dados são então utilizados para a geração dos índices de capacidade.

Deste modo, adquirindo-se dados de forma sistemática e monitorizando-se o processo atinge-se o controlo estatístico, dando espaço a posteriores análises e o surgimento de eventuais propostas de melhorias para assim se atingir patamares superiores de desempenho, qualidade e eficiência. Esta análise aplica-se aos dados que mostrem uma distribuição normal e então o processo pode ser descrito pela média e pelo seu desvio padrão, como mostra a Figura 4.1 [8] [9] [10].

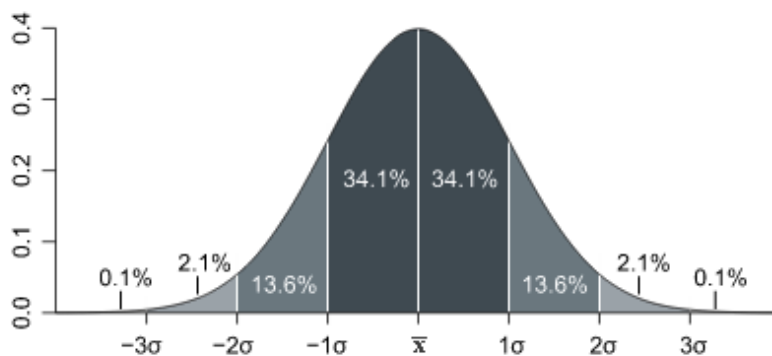


Figura 4.1 - Gráfico de curva de distribuição normal.

A denominação $\pm 2\sigma$ (**4 sigma**) e $\pm 3\sigma$ (**6 sigma**) têm o seguinte significado:

- $\pm 2\sigma$ (**4 sigma**): representa aproximadamente **95 %** do universo da amostra;
- $\pm 3\sigma$ (**6 sigma**): representa aproximadamente **99.7 %** do universo da amostra;

Sendo σ , ou sigma, o desvio padrão (*standard deviation of the sample*) dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.3)$$

Sendo N o número total de amostras, x_i a amostra de índice i , $\bar{x}$ a média do universo das amostras.

O cálculo apresentado é o nativo, que corresponde ao *standard deviation of the sample*, que é dividido pelo número total de amostras N , em vez do cálculo com a correcção de *Bessel*, que usa $N - 1$ para a sua divisão. Este último cálculo é adequado para situações nas quais se seleccionam amostras aleatórias da população.

Os índices de capacidade permitem a indicação, para um dado processo sob controlo estatístico, da relação entre a gama de tolerâncias especificadas para uma dada característica de produto e a variabilidade natural do processo produtivo destinado à obtenção daquela característica (a variabilidade devida às causas comuns).

Assim, temos o **índice Cp** [8] [9] [10], calculado através de:

$$C_p = \frac{UpperLimit - LowerLimit}{6\sigma}, \quad (4.3)$$

Onde σ é o desvio padrão, *UpperLimit* o limite superior e *LowerLimit* o limite inferior; e o **índice Cpk**, que por sua vez leva em conta a centralização do processo e é definido como o mínimo entre o *UpperLimit* e o *LowerLimit*, portanto, permite a medição de quanto um determinado processo está a ser executado nas suas especificações de limites.

$$C_{pk} = \text{Min} \left[\frac{UpperLimit - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - LowerLimit}{3\sigma} \right], \quad (4.4)$$

Onde $\bar{x}$ é a média do parâmetro do processo em avaliação.

Os valores de Cp deverão ser superiores a 2 e os valores de Cpk deverão ser superiores a 1.33, mostrando assim, que o parâmetro do processo em avaliação está sob controlo estatístico.

4.2 - Controlo estatístico do processo de caracterização dos sensores de temperatura

Periodicamente deverão ser executadas análises estatísticas aos diversos parâmetros resultantes do processo de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg. Para o efeito foi desenvolvida no âmbito deste trabalho a aplicação *SSAnalysis.exe*¹⁷, que permite seleccionar o historial de dados pretendido. Esta selecção dos dados, pode ser realizada via ficheiro externo (dados extraídos previamente para ficheiro) ou através de *queries* ou consultas à tabela “TSCalibrationResults”¹⁸, pertencente à base dados “Producao” localizada no servidor, que contém todos os registos dos parâmetros da calibração dos sensores de temperatura.

Esta aplicação de análise estatística, orientada para os sensores de temperatura baseados em redes de Bragg, permite a visualização gráfica dos dados seleccionados para a sua análise, através de um gráfico do tipo histograma, dos diversos parâmetros (*fields*) importantes para o processo de calibração dos sensores:

- . Coeficientes de sensibilidade S2 de ordem 2;
- . Coeficientes de sensibilidade S1 de ordem 1;
- . Coeficientes de sensibilidade S0 de ordem 0;
- . O desvio da aproximação polinomial;
- . O comprimento de onda central de referência CWL;
- . O valor do erro de histerese;
- . O valor do erro de FOS;

A informação estatística disponível ao utilizador – índices estatísticos, que permitem a análise dos diversos parâmetros da calibração e posterior ajustes são:

- . O universo de amostra;
- . A média aritmética;
- . O valor mínimo e máximo;
- . A gama de valores;
- . O desvio padrão σ ;
- . Valor de $\pm 3\sigma$, correspondendo a 99.7% das amostras numa distribuição normal;
- . Os índices de capacidade do processo Cp e Cpk;
- . O limite superior e inferior do parâmetro em análise.

¹⁷ O significado do nome da aplicação *SSAnalysis.exe* é “*Sensor Statistical Analysis*”, orientado para os sensores de temperatura baseados em redes de Bragg.

¹⁸ Para mais detalhes do registo e acesso à esta tabela de base de dados, consultar o anexo 2, denominado «*Aplicação TemperatureSensorCalibration.exe de suporte à calibração de sensores de temperatura*»

A aplicação permite adicionalmente ao utilizador, realizar a análise de ajuste de limite superior e inferior do parâmetro em avaliação, de modo a obter-se valores exigíveis e aceitáveis de monitorização da capacidade do processo, cujo valores para esses critérios, já mencionados anteriormente, o valor mínimo a respeitar de $C_p \geq 2$ e $C_{pk} \geq 1.33$, de modo a definir novos limites de validação para o parâmetro em análise do processo. Na Figura 4.2 apresenta-se o código em LabVIEW para o cálculo das grandezas estatísticas, realizado pela aplicação *SSAnalysis.exe*¹⁹.

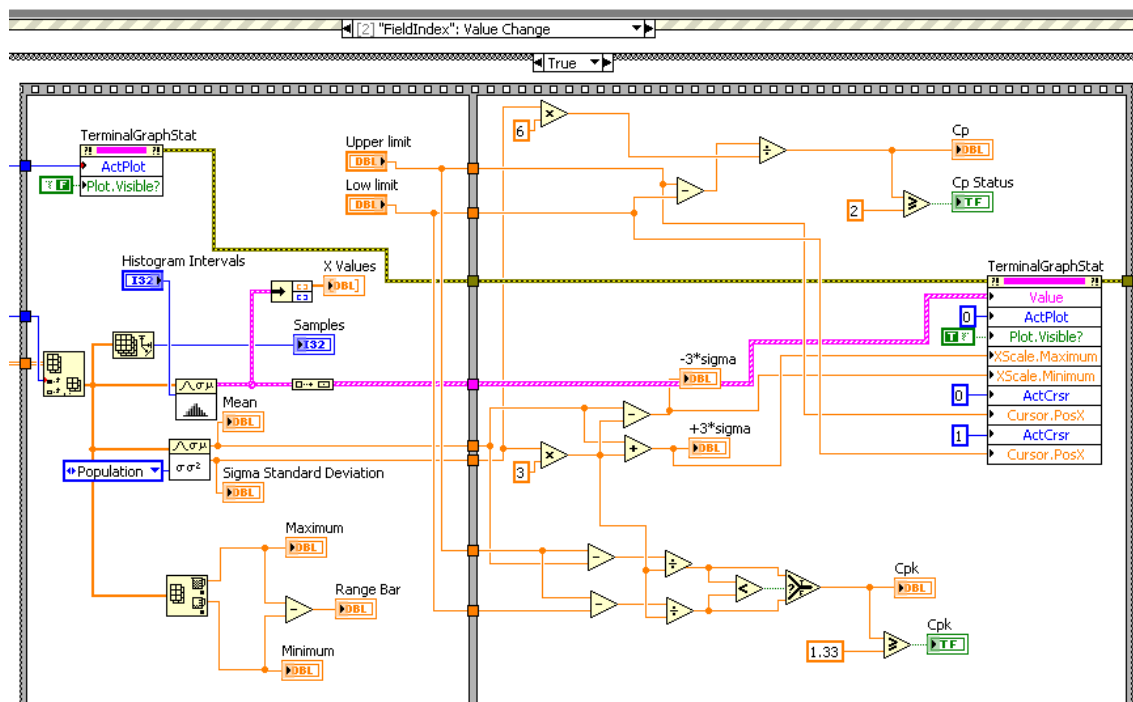


Figura 4.2 – Código em LabVIEW da aplicação “SSAnalysis.exe” para o cálculo grandezas estatísticas.

¹⁹ O significado do nome da aplicação *SSAnalysis.exe* é “Sensor Statistical Analysis”, orientado para os sensores de temperatura baseados em redes de Bragg.

Coeficiente sensibilidade

Todos os dados apresentados nesta secção, referem-se integralmente a dados reais, extraídos da tabela “TSCalibrationResults”²⁰, da base dados “Producao” localizada no servidor, correspondente aos sensores de temperatura do tipo «*Embedded Temperature Sensor*» calibrados até à data da análise. Foram analisadas 32 amostras válidas.

É apresentada a análise estatística aos coeficientes de segunda ordem, primeira ordem e termo independente (ordem 0) da equação resultante da aproximação polinomial, proveniente da calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg.

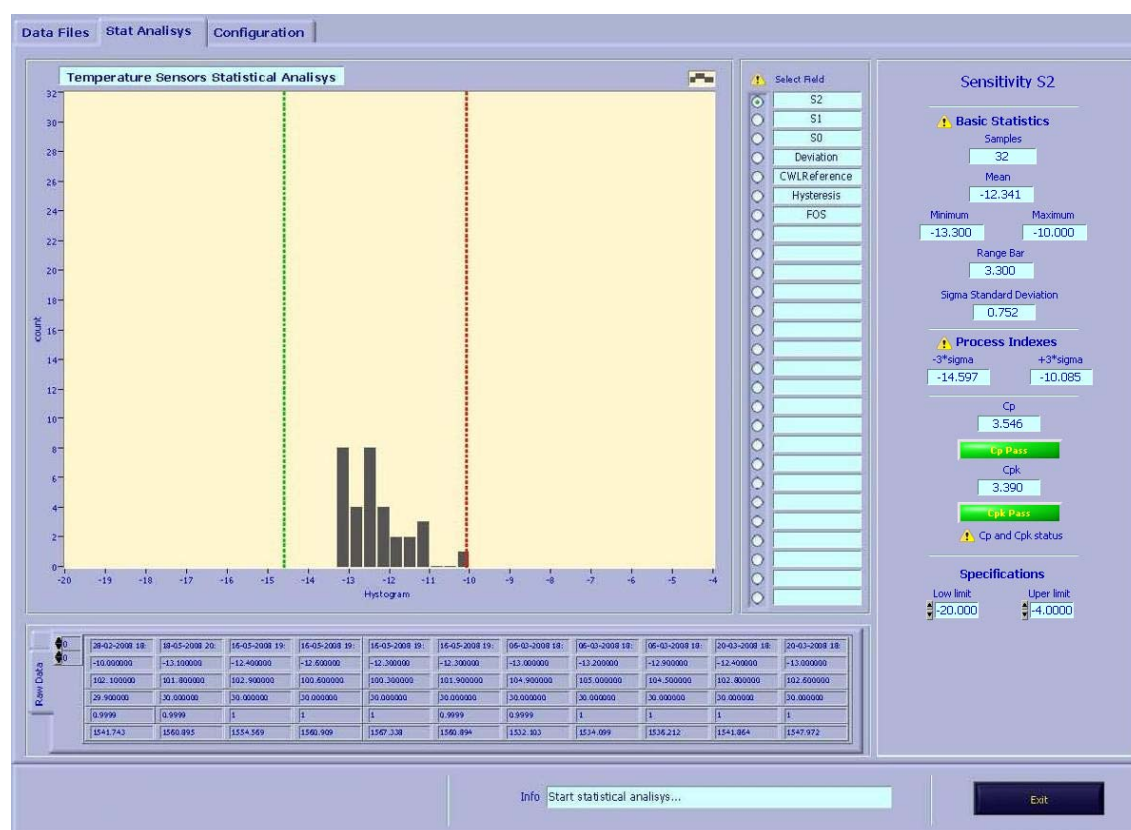


Figura 4.3 - Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro S2.

A análise do parâmetro S2 do processo de calibração (ver Figura 4.3), para o universo mencionado, obteve-se um valor para Cp de 3.55 e Cpk de 3.39, indicando que este parâmetro respeita os critérios, sendo portanto um parâmetro sob controlo estatístico.

²⁰ Para mais detalhes do registo e acesso à esta tabela de base de dados, consultar o anexo 2, denominado «*Aplicação TemperatureSensorCalibration.exe de suporte à calibração de sensores de temperatura*»

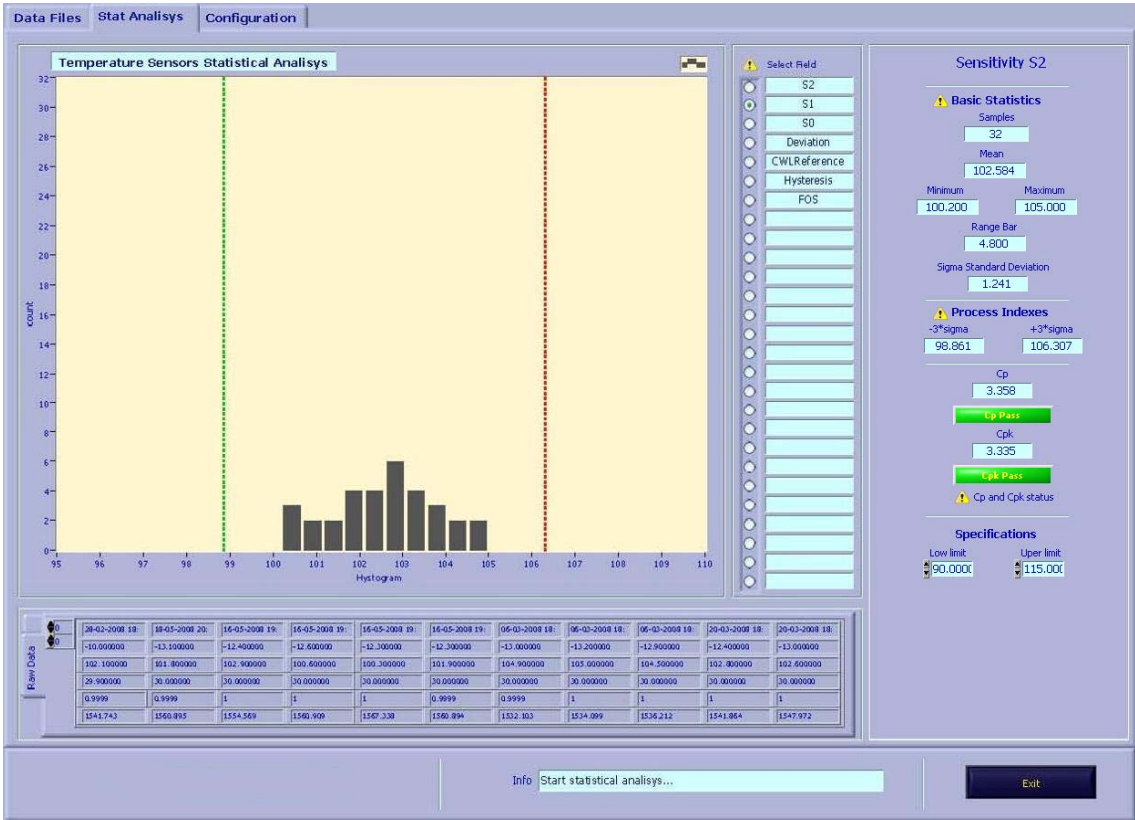


Figura 4.4 - Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro S1.

A análise do parâmetro S1 do processo de calibração (ver Figura 4.4), para o universo mencionado, obteve-se um valor para Cp de 3.36 e Cpk de 3.34, indicando que este parâmetro respeita os critérios, sendo portanto, um parâmetro sob controlo estatístico.

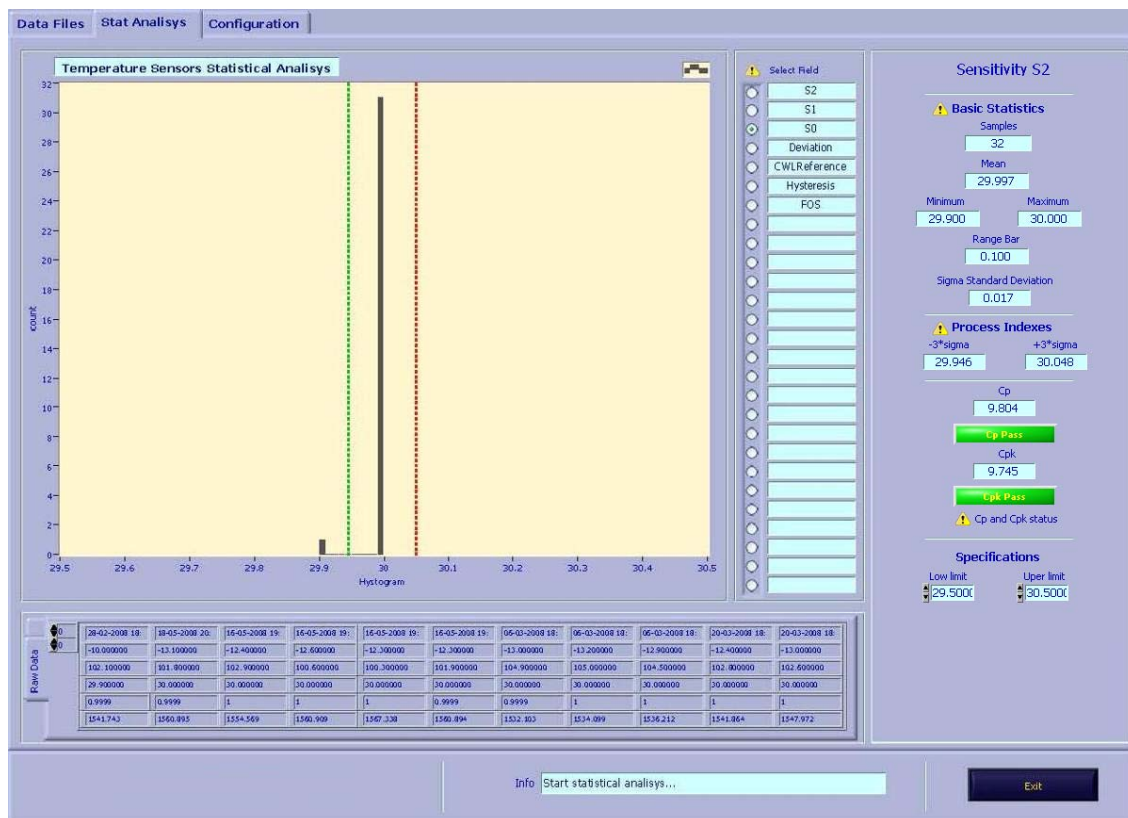


Figura 4.5 - Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro S0.

A análise do parâmetro S0 do processo de calibração (ver Figura 4.5), para o universo mencionado, obteve-se um valor para Cp de 9.80 e Cpk de 9.75, indicando que este parâmetro respeita os critérios, sendo portanto, um parâmetro sob controlo estatístico.

Indicadores de avaliação da calibração

As Figura 4.6 e Figura 4.7 ilustram a análise estatística aos indicadores erro máximo *FOS* e *histerese* resultante da aproximação polinomial, provenientes da calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg.



Figura 4.6 – Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro Erro Máximo FOS.

A análise do parâmetro FOS do processo de calibração (ver Figura 4.6), para o universo mencionado, obteve-se através da aplicação, um valor para Cp de 1.72 e Cpk de 1.22, indicando à primeira vista, que este parâmetro não respeita os critérios de 2 e 1.33 respectivamente, não sendo portanto, um parâmetro sob controlo estatístico. No entanto, o parâmetro FOS é um parâmetro que tem um dos seus limites – o limite inferior, definido com o valor 0 (zero). Nestes casos, a definição original de Cpk é alterada, entrando apenas em conta com o limite superior, uma vez que o que teoricamente se pretendia seria que este parâmetro estivesse o mais próximo possível do limite 0 (zero).

$$C_{pk} = \frac{UpperLimit - \bar{x}}{3\sigma}, \quad (4.5)$$

Aplicando a definição apresentada, o novo valor de Cpk é 2.21, respeitando assim o limite especificado. No entanto, o índice Cp está ligeiramente abaixo do desejado. Uma vez que o limite máximo e mínimo deste parâmetro não são de ajuste – são fixos e portanto inalteráveis, remete-se para uma nova avaliação, a realizar posteriormente, usando um universo de amostras maior, esperando que com o aumento do número amostras mais centradas na média, a distribuição venha a alterar-se e portanto os índices a terem valores razoavelmente bons.

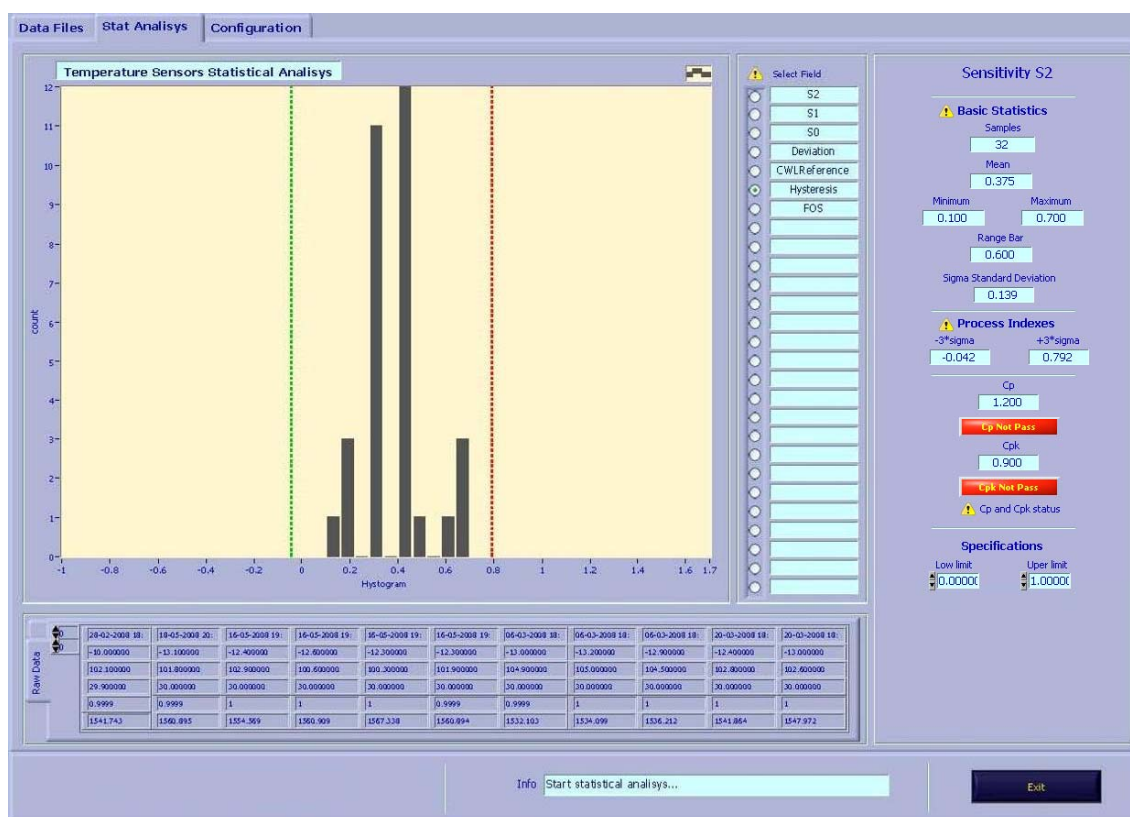


Figura 4.7 – Análise estatística do processo de calibração sensores temperatura, parâmetro histereses.

A análise do parâmetro Histerese do processo de calibração (ver Figura 4.7) para o universo mencionado, obteve-se através da aplicação, um valor para Cp de 1.20 e Cpk de 0.90, indicando à primeira vista, que este parâmetro não respeita os critérios de 2 e 1.33 respectivamente, não sendo portanto, um parâmetro sob controlo estatístico. No entanto, o parâmetro histerese é um parâmetro que tem um dos seus limites – o limite inferior, definido com o valor 0 (zero). Nestes casos, a definição original de Cpk é alterada, dada pela equação 4.5. Então, após o cálculo, o novo valor de Cpk é 1.50, respeitando assim o critério.

As conclusões retiradas para o parâmetro FOS aplicam-se à análise do parâmetro histerese.

Este tipo de procedimento deverá fazer parte dos trabalhos periódicos de análise estatística do processo, para controlo de desvios de fabricação e calibração, de modo a, por um lado, minimizar a redução de falsa rejeição e por outro, filtrar eventuais defeitos inerentes à fabricação dos sensores, que comprometam o seu desempenho. Não foram apresentadas dados sobre o parâmetro *CWLReference*, uma vez que, este parâmetro não contribui para análise estatística. A justificação prende-se pelo facto de ser um parâmetro que depende da necessidade de produção, escolhido pelos clientes para as suas necessidades. Por outro lado, o parâmetro *Deviation*, não foi apresentado, pois não traz mais-valia relevante, em termos de dados, face aos outros parâmetros, uma vez que este parâmetro varia entre 0.9999 e 1.

Capítulo 5

Conclusão e desenvolvimentos futuros

Feito o balanço do trabalho, deve mencionar-se a enorme e fascinante transversalidade de áreas técnicas que esta temática aborda, desde o desenvolvimento de uma aplicação em software para controlo de um equipamento ou para utilização em produção, até à área de comportamentos dos materiais, térmica e mecanicamente, passando pela área das fibras ópticas e os sensores baseados em redes de Bragg, sem esquecer a abrangente área da electrónica.

O trabalho desenvolvido dividiu-se em duas grandes estratégias: um primeiro desenvolvimento de procedimentos usando uma câmara de ciclos térmicos, que foi concluído e apresenta-se muito estável e eficiente a desempenhar os trabalhos de calibração; e um segundo desenvolvimento, de construção de raiz de um sistema baseado em *bloco seco* que permita que os sensores tenham continuidade das terminações de fibra óptica, para a possibilidade de ligações ópticas em série com outros sensores ópticos, de temperatura ou de outras grandezas, uma vez que é uma das características mais fortes e diferenciadoras neste tipo de tecnologia de sensores. Este sistema não foi concluído, embora se tenha aferido importantes conclusões e efectuado ensaios que sustentam essas conclusões.

A etapa seguinte do desenvolvimento do FSBlockCalibrator passa pela construção física do protótipo nº2, descrito no tópico “Modelo do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº2” e apresentado na Figura 3.34, previamente estudado nos ensaios antecedentes, baseado em cascata de elementos Peltier, isolamento eficiente, baseado em teflon ou poliuretano e um arrefecimento eficiente, baseado em cooler de CPU.

A etapa posterior passaria pelo desenvolvimento da aplicação gestora do sistema completo, apresentada na Figura 3.35. Esta aplicação irá utilizar a aplicação *TemperatureSensorCalibration.exe*, para a base de partida, a integração da aplicação *ThermoMETERReadout.exe* para a obtenção dos valores de temperatura do padrão de referência, a aplicação *SSAnalysis.exe* para a realização de análise estatística e a utilização do algoritmo apresentado no anexo 6, denominado *AutomaticStabilitySearch.vi*, para a automatização do processo de análise dos diversos patamares de temperatura, no decorrer da calibração, otimizando deste modo o tempo do processo, uma vez que deixa de ser manual, obtendo-se adicionalmente um aumento do rigor dos dados seleccionados. Este algoritmo é baseado na aplicação da derivada a um conjunto finito de dados, correspondente a um conjunto parcial do patamar.

Posteriormente, as tarefas passariam pelo desenvolvimento da placa electrónica de controlo para a potência, de modo a ser possível o controlo via PWM, com a utilização de uma placa DAQ PCI para computador, com entradas e saídas analógicas.

Após a congregação do sistema completo, fraseiam os primeiros ensaios e ajustes necessários para o sistema ser eficiente e optimizado para a tarefa de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg. A uniformização térmica do bloco cilíndrico interior deverá ser determinada, de modo a definir um gradiente de temperatura conhecido e entrar com as devidas compensações na calibração, de modo a respeitar os mais exigentes padrões de Metrologia.

Referências

- [1] “Ignition Tests With a Fiber-Optic Powered Instrument”, Thomas H. Dubaniewicz, Kenneth L. Cashdollar and Gerald R. Cucci.
- [2] “Sensores de Bragg em Fibra Óptica”, O. Frazão, F. M. Araújo, L. A. Ferreira, J. R. F. da Rocha, A. L. J. Teixeira, M. J. N. Lima, Setembro 2000.
- [3] “Vocabulário Internacional de Metrologia VIM”, Guia ISO/IEC 99, 3ª edição, edição Portuguesa, IPQ, Novembro 2008.
- [4] “The Calibration of Thermocouples and Thermocouple materials”, publication of NIST (National Institute of Standards and Technology, G.W.Burns, M.G. Scroger, Abril de 1989.
- [5] “The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)”, www.its-90.com website.
- [6] “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, publication reference EA 4/02, EA - European co-operation for Accreditation, rev00, Dezembro de 1999.
- [7] “Does “Welch-Satterthwaite” make a good uncertainty estimate?”, B.D. Hall e R.Willink, Metrologia, 2001.
- [8] “Process Capability”, Wikipedia, 2009.
- [9] “Quality Assurance in the Bosch Group, *Technical Statistics*”, 2003
- [10] “SixSigma Process Capability”, www.isixsigma.com, 2009.

Anexos

Anexo 1

Aplicação do *ThermoMETERReadout.exe* desenvolvida

Para o auxílio da execução dos procedimentos de calibração de sensores de temperatura baseados em redes Bragg, foi desenvolvido no âmbito do presente trabalho, uma aplicação em *LabVIEW*, denominada *ThermoMETERReadout.exe*, com o objectivo de se obter o valor de temperatura medido pela ponta de prova *PRT* (5608) e pelo termómetro digital equipamento de medição digital (1502A). A comunicação segue o protocolo RS232 standard.

Para além do código desenvolvido para o interface gráfico com o utilizador, salienta-se o diagrama bloco, desenvolvido para a comunicação via protocolo série RS232, entre o equipamento e o computador desktop, como se visualiza na Figura 5.1:

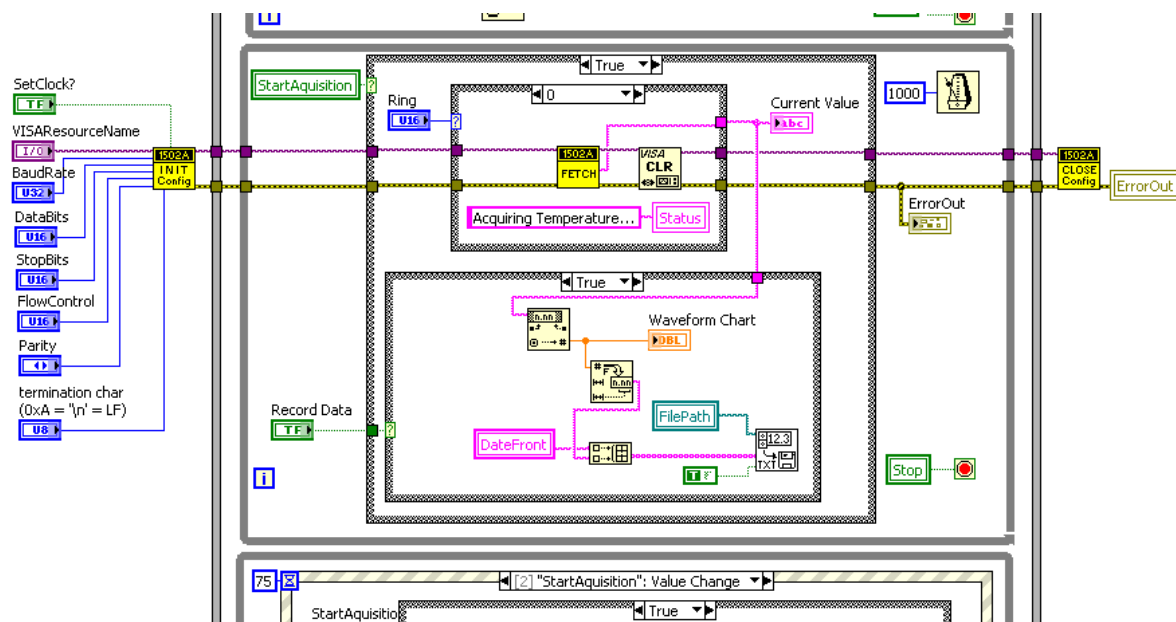


Figura 5.1 – Diagrama bloco contemplando comunicação via protocolo série RS232 com o equipamento de medição digital (1502A).

A comunicação série RS232 segue as seguintes etapas:

- **VISA Configure Serial Port** – configura a porta série com os devidos parâmetros (ver parâmetros na Figura 5.4 descritiva do *tab SerialConfiguration*);
- **VISA Open** – abre a comunicação via protocolo série RS232;
- **VISA Write** – escreve comandos para a porta série RS232;
- **VISA Read** – lê *strings* da porta série RS232;
- **VISA Close** – fecha a comunicação série RS232.

Que são congregadas nos seguintes VI's

- **1502AInitConfig** – configura e abre comunicação via protocolo série RS232;
- **1502AFETCH** – envia comando de leitura (fetch) e recebe a leitura corrente do equipamento equipamento de medição digital (1502A);
- **1502AClose** – fecha a comunicação série RS232;

No que concerne ao interface gráfico com o utilizador, a aplicação divide-se em três *tabs*: «Init», «Readings» e «Serial Configurantion».

O *tab* «Init», permite, por parte do utilizador, a introdução do nome do ficheiro, a ser agregado à data e hora do momento em que se inicia a aquisição da temperatura, pressionando o botão «Acquiring...».

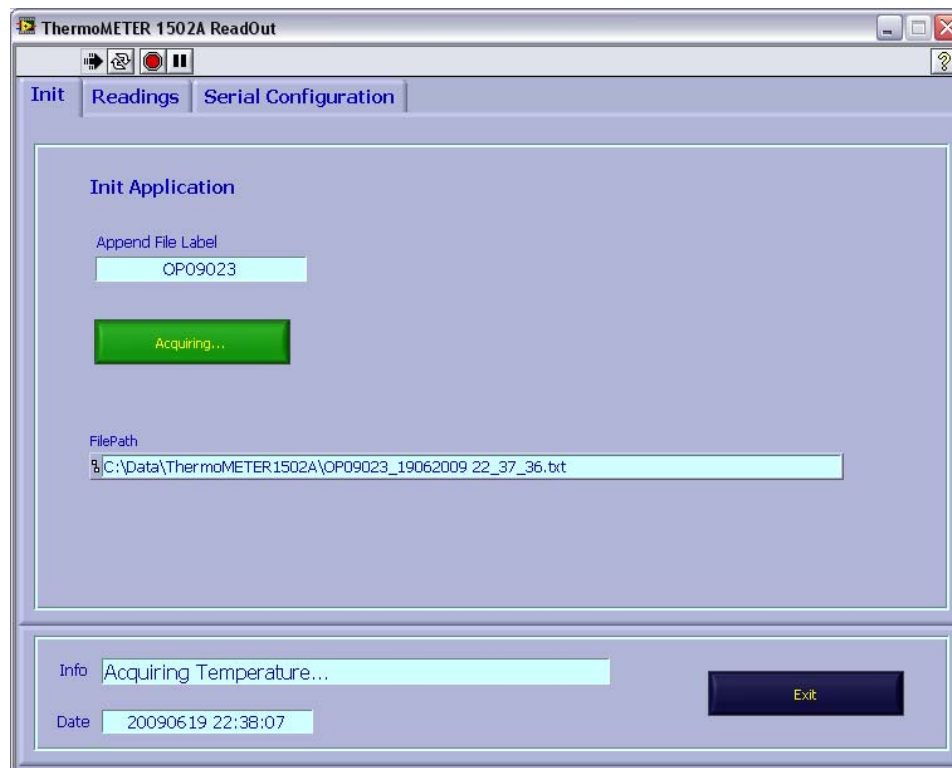


Figura 5.2 – Interface gráfico aplicação ThermoMETERReadout.exe – tab Init.

O tab «Readings», permite a visualização dos dados recebidos pelo equipamento de medição digital (1502A), via protocolo série RS232, via valor actual ou via gráfico (histórico), assim como a possibilidade de gravação para ficheiro do tipo txt.

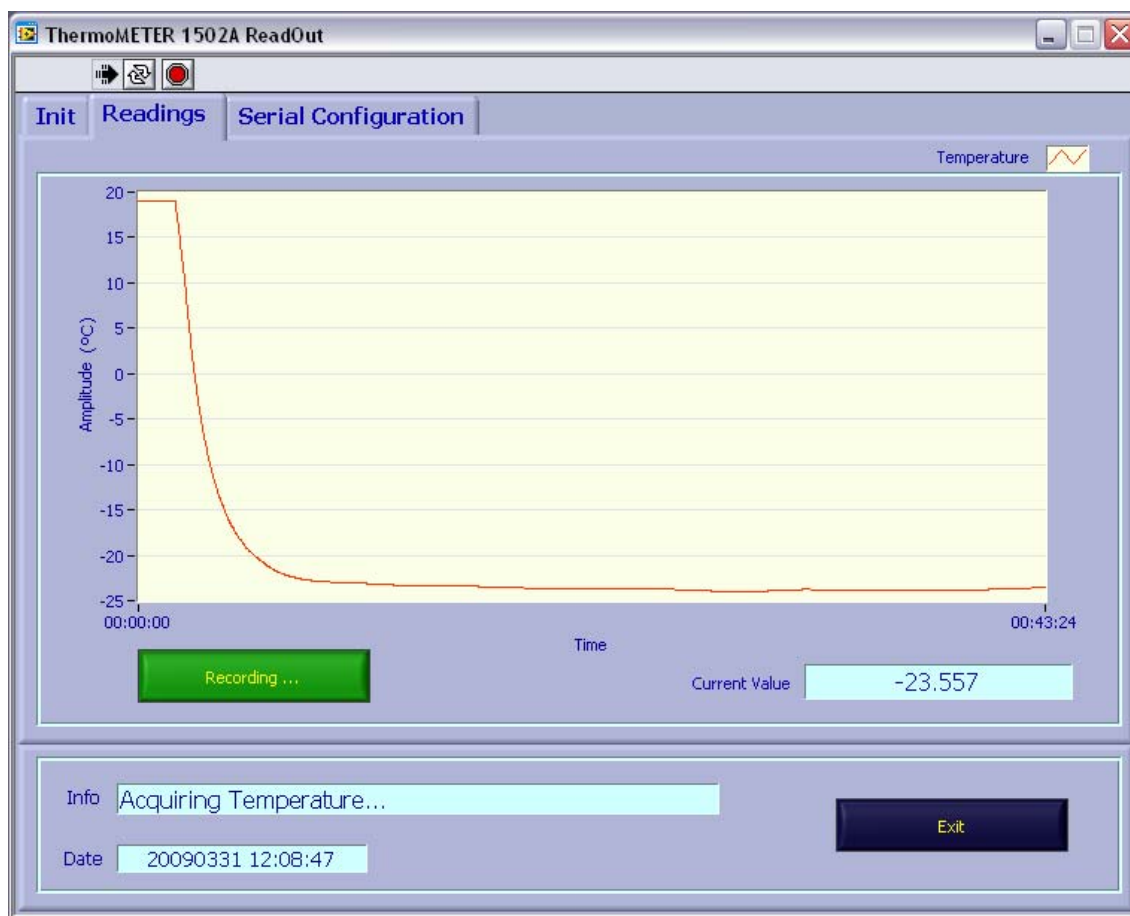


Figura 5.3 - Interface gráfico aplicação ThermoMETERReadout.exe – tab Readings.

O tab «Serial Configuration», permite aceder aos parâmetros de configuração do hardware, nomeadamente à porta COM seleccionada, que permitirá a comunicação via protocolo série RS232. Também poderá seleccionar o tipo de comando para recolher o valor corrente da temperatura do equipamento de medição digital (1502A).

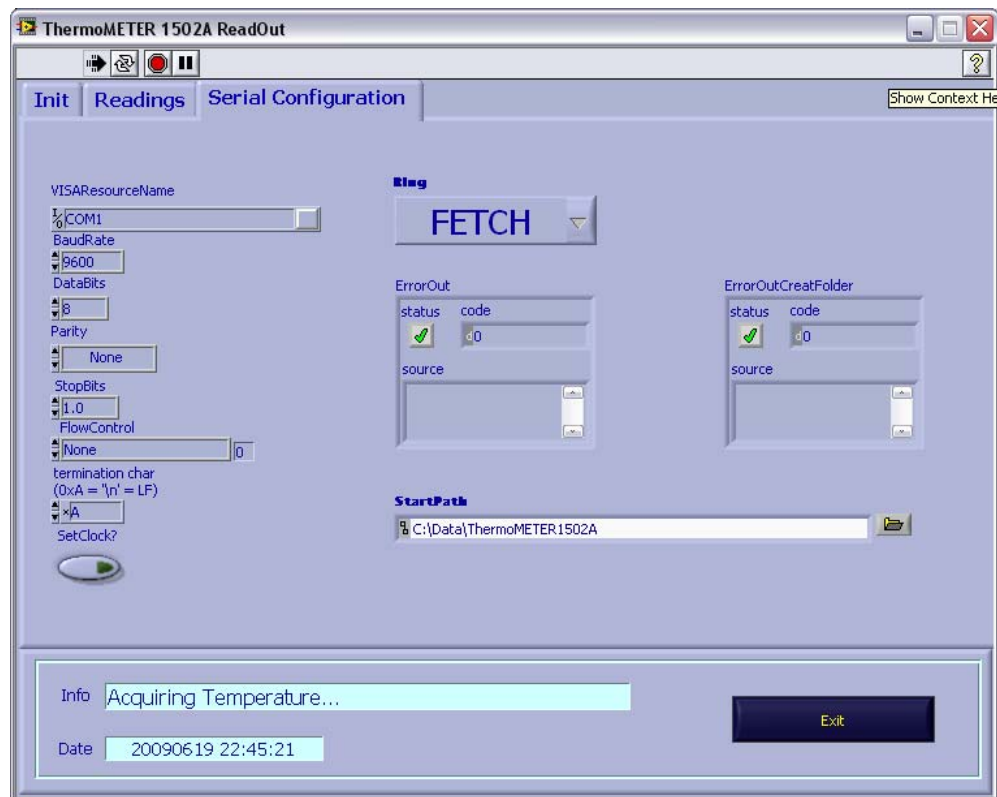


Figura 5.4 - Interface gráfico aplicação ThermoMETERReadout.exe – tab Serial Configuration.

«Fim do anexo 1»

Anexo 2

Aplicação *TemperatureSensorCalibration.exe* de suporte à calibração de sensores de temperatura

Para o auxílio da execução dos procedimentos de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg, foi desenvolvido no âmbito do presente trabalho, uma aplicação em *LabVIEW*, denominada “*TemperatureSensorCalibration.exe*”, que implementa todos os requisitos necessários à tarefa de recolha de dados.

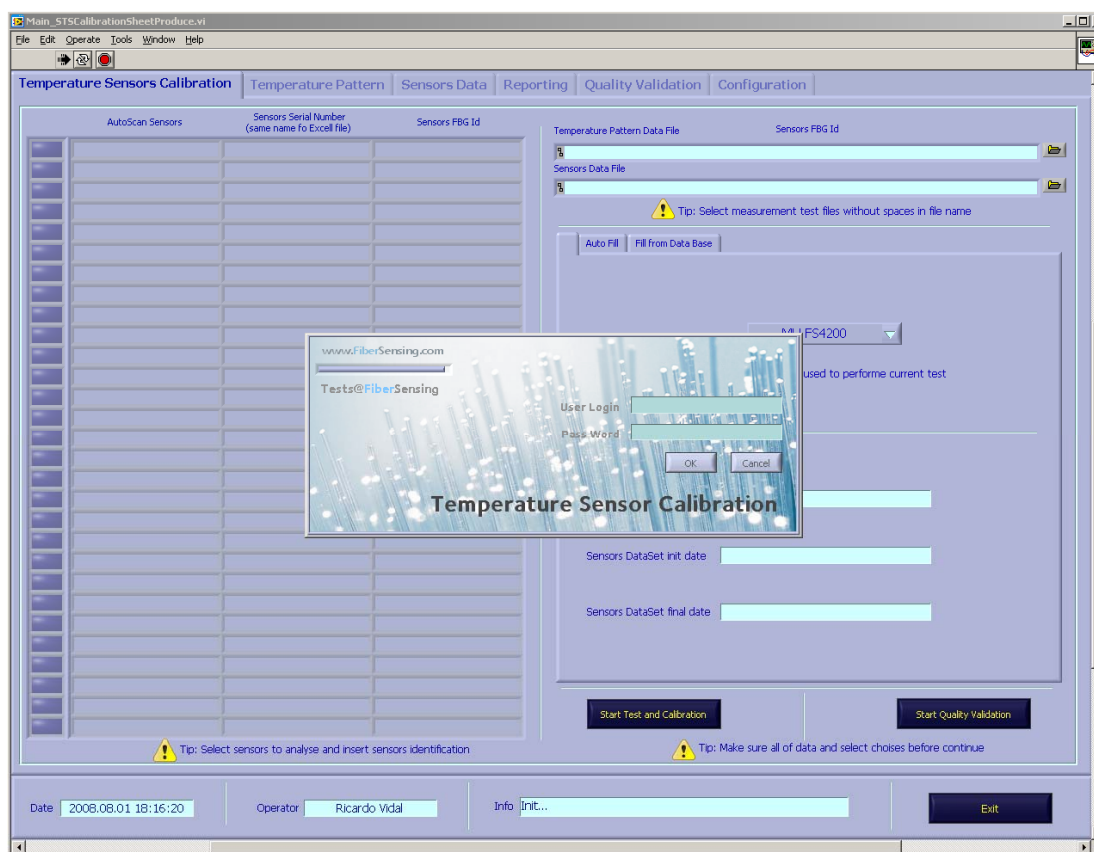


Figura 5.5 - Aplicação de calibração de sensores de temperatura baseados em redes Bragg.

De seguida, faz-se referência aos passos fundamentais da aplicação, que são acompanhadas de um texto resumido, explicativo das diversas etapas.

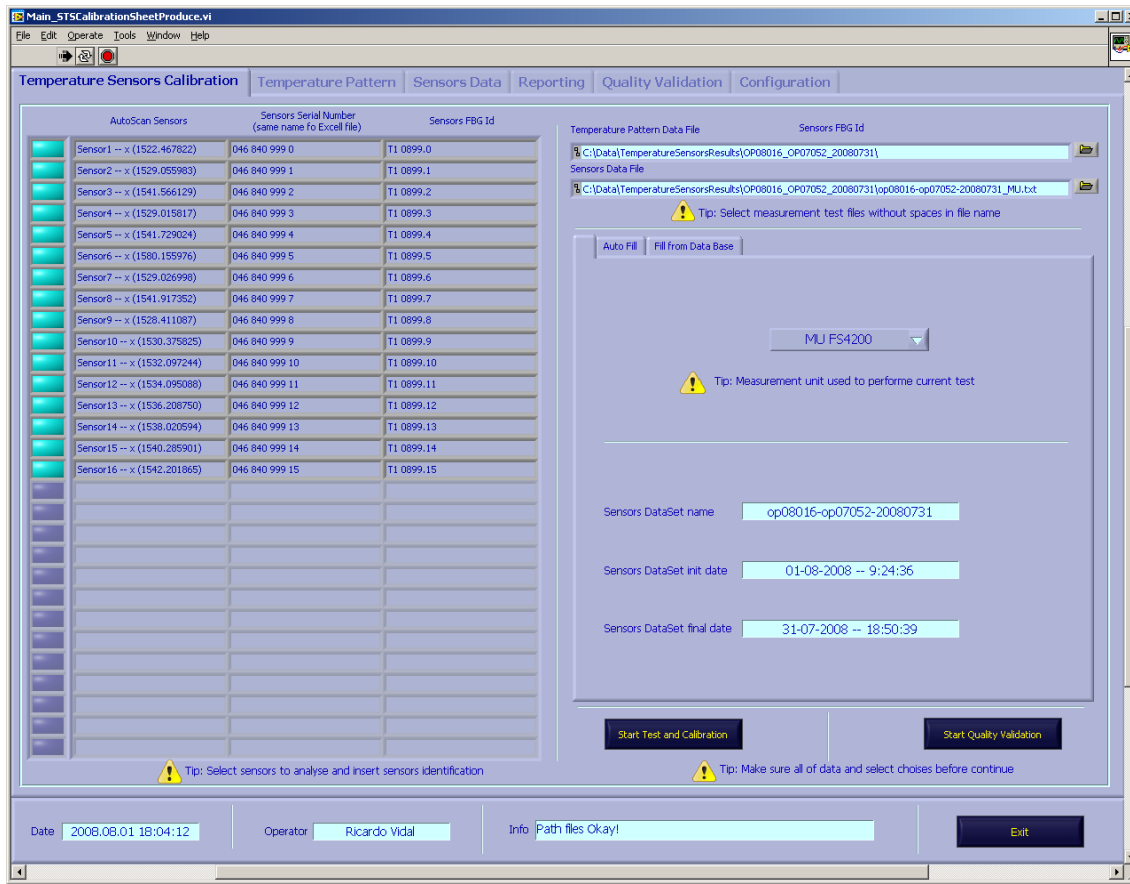


Figura 5.6 - Aplicação Tab para inserir dados de entrada dos sensores a caracterizar.

No *tab* inicial da aplicação (ver Figura 5.6), após o login do utilizador (para histórico e rastreabilidade) (ver

Figura 5.5) procede-se ao carregamento dos ficheiros, que contêm os dados recolhidos pelo padrão de temperatura e os dados recolhidos dos sensores de temperatura a calibrar, seguido da identificação de cada sensor: o seu *Serial Number* e *FBGNameId* (identificador único de cada estrutura FBG). Existe adicionalmente a possibilidade de aceder a anteriores registos, provenientes da base de dados, residente no servidor local, através da opção *Fill From DataBase* e a opção *AutoFill*, que permite rapidamente preencher todos os campos com dados por *default*, de modo a ser possível depreender uma análise à caracterização dos sensores.

Após a entrada da identificação de cada sensor, selecciona-se a opção *Start Test and Calibration*, que permite aceder às funcionalidades seguintes da calibração. Seleccionando esta opção, a aplicação comuta automaticamente para o *tab Temperature Pattern*, que disponibiliza em forma de gráfico, os dados provenientes do ficheiro, do padrão de temperatura, conforme a Figura 5.7.



Figura 5.7 - Tab para definição dos valores reais médios dos patamares do padrão de temperatura.

O utilizador irá seleccionar graficamente e criteriosamente, através de cursores disponíveis (cursor Left e cursor Right), o intervalo válido de cada patamar de temperatura, tendo em atenção a estabilização após o overshoot proveniente da transição entre patamares. O objectivo é recolher doze valores reais médios de temperatura, correspondendo aos doze patamares do perfil real do padrão de temperatura, a que os sensores foram submetidos.

Uma vez definidos os valores reais da temperatura para cada um dos doze patamares, sucede-se a análise e selecção do comportamento dos sensores de temperatura, face ao perfil de temperatura submetidos, no tab *Sensors Data*, conforme a Figura 5.8.



Figura 5.8 - Tab para análise e selecção dos patamares da resposta dos sensores temperatura.

Assim, o utilizador deverá, de forma semelhante à etapa anterior, seleccionar graficamente e criteriosamente, usando os cursores disponíveis (cursor Left e cursor Right), o intervalo válido de cada patamar para cada sensor, tendo em atenção a estabilização após o overshoot proveniente da transição entre patamares. O objectivo é recolher doze valores reais médios de resposta de cada sensor, correspondendo à resposta aos doze patamares do perfil real de temperatura.

No fim de cada selecção do conjunto dos doze patamares, o utilizador deverá seleccionar a opção *Analyse Sensor Data*. Esta funcionalidade executa a seguinte sequência de eventos, para cada sensor de temperatura:

- i) Efectua uma cópia do template em Office Excel, da *Folha de Calibração*, para o directório local de trabalho (localização dos ficheiros de dados do padrão de temperatura e resposta dos sensores de temperatura), nomeando o ficheiro resultante, com o *Serial Number* do sensor introduzido;

Através de *control Active-X*, insere-se os valores médios de cada patamar seleccionado, do padrão de temperatura e os valores médios de cada patamar seleccionado, de cada sensor a ser calibrado, no template Office Excel, que efectua todos os cálculos para a calibração e geração da *Folha de Calibração*, ver Figura 5.9.

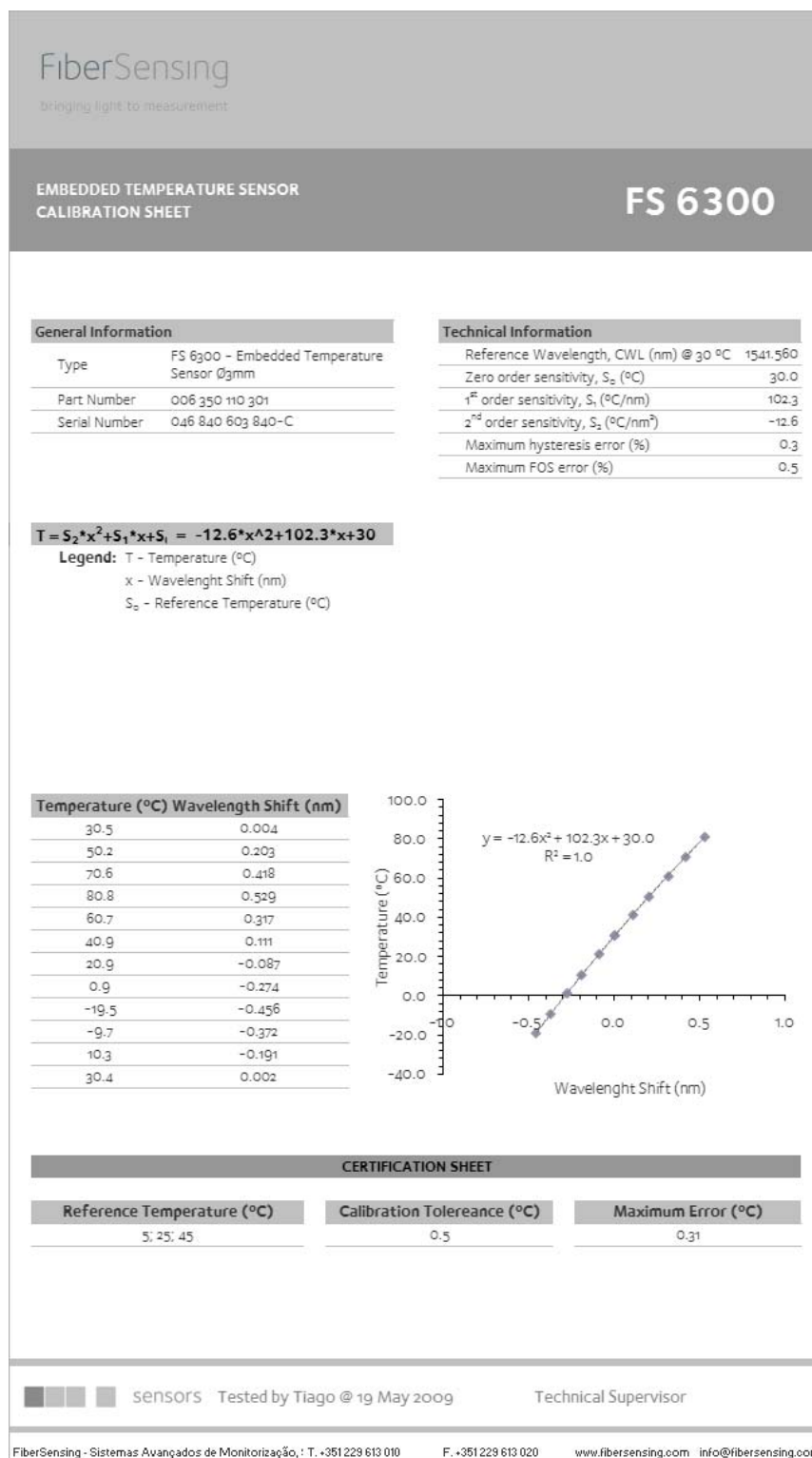


Figura 5.9 – Folha de Calibração de sensor de temperatura baseado em redes de Bragg.

- ii) Através de *control Active-X*, extrai da *Folha de Calibração* gerado, os parâmetros da calibração importantes, recolhe data e hora, operador, entre outros e executa uma inserção na tabela “TSCalibrationResults” de todos os valores e elementos importantes para a calibração. A tabela foi também desenvolvida no âmbito do presente trabalho, localizada na base dados “Producao” no servidor, usando sintaxe *SQLServer*, utilizando ODBC para interface com LabVIEW. A Figura 5.10 explicita os campos da tabela mencionada.

Table - dbo.TSCalibrationResults		
	Column Name	Data Type
	TestId	int
	Date	datetime
	PassStatus	int
	SerialNumber	varchar(50)
	PartNumber	varchar(50)
	FBGNameId	varchar(50)
	CalibrationFormula	varchar(50)
	Deviation	float
	CWLReference	float
	Hysteresis	float
	FOS	float
	Operator	varchar(50)
	S2Max	float
	S2Min	float
	S1Max	float
	S1Min	float
	HysteresisMax	float
	FOSErrorMax	float
	FinalValidationError	float
	FinalValidationErrorMax	float
	Iteration	int

Figura 5.10 – Campos da tabela TSCalibrationResults” da base dados “Producao” no servidor.

- iii) Insere na lista do tab *Reporting*, os parâmetros importantes da calibração, para permitir ao utilizador a sua visualização e validação da operação de calibração (ver Figura 5.11);

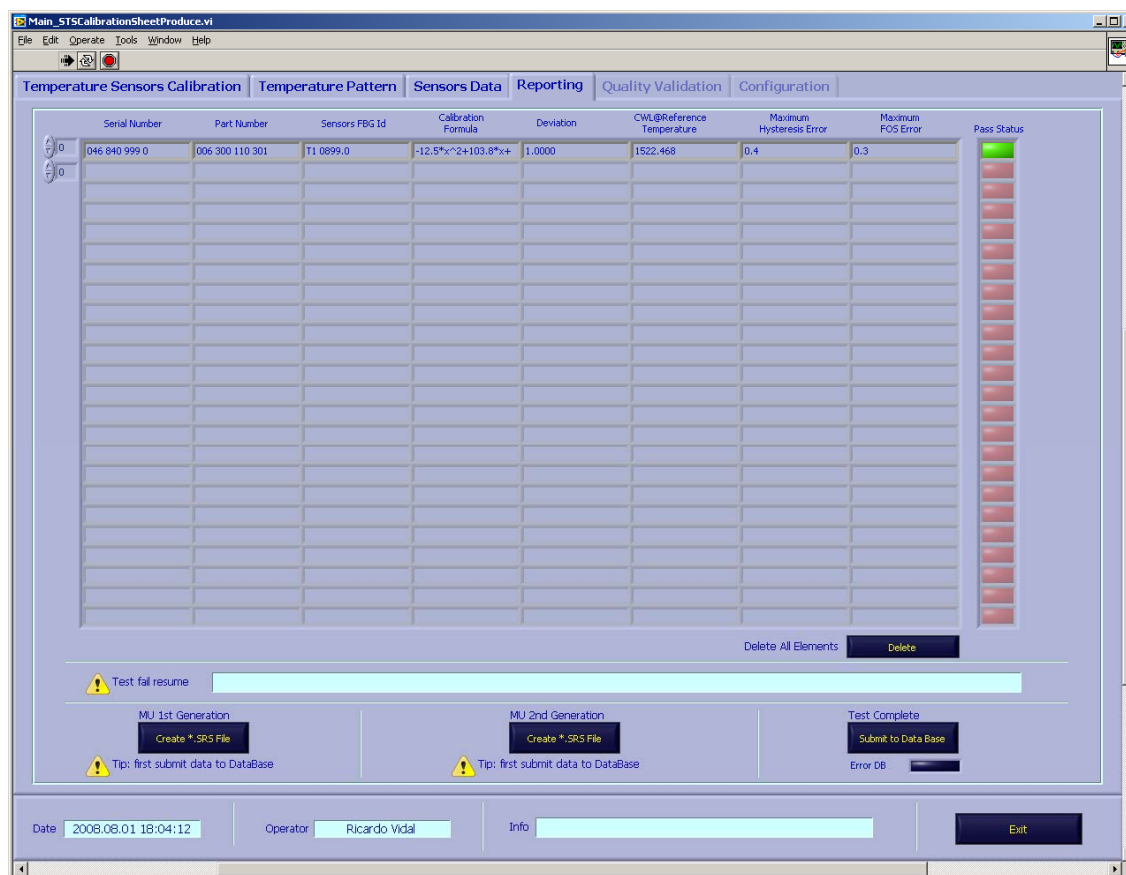


Figura 5.11 – Tab Reporting – parâmetros importantes da calibração, para a visualização e validação da operação, por parte do utilizador.

Depois desta etapa finalizada, volta-se novamente a submeter os sensores a um perfil de temperatura diferente, para que se realize um teste de qualidade, de 3 horas de duração, com as temperaturas 5°C, 25°C e 45°C. Para tal, será necessário configurar-se na unidade *BraggMETER FS4200*, cada um dos sensores, com a fórmula gerada, assim como o valor absoluto do comprimento de onda central a 30°C. Assim, decorrido todo o processo de submeter a novo perfil de temperatura, reúne-se os ficheiros e carregam-se de novo para a aplicação (ver Figura 5.12).

Figura 5.12 – Tab para inserir dados de entrada dos sensores a caracterizar – QuV.

Identificando novamente cada sensor, o utilizador deverá desta vez seleccionar a opção *Start Quality Validation*. Também deverá seleccionar, para cada patamar, o valor médio real do padrão de temperatura.

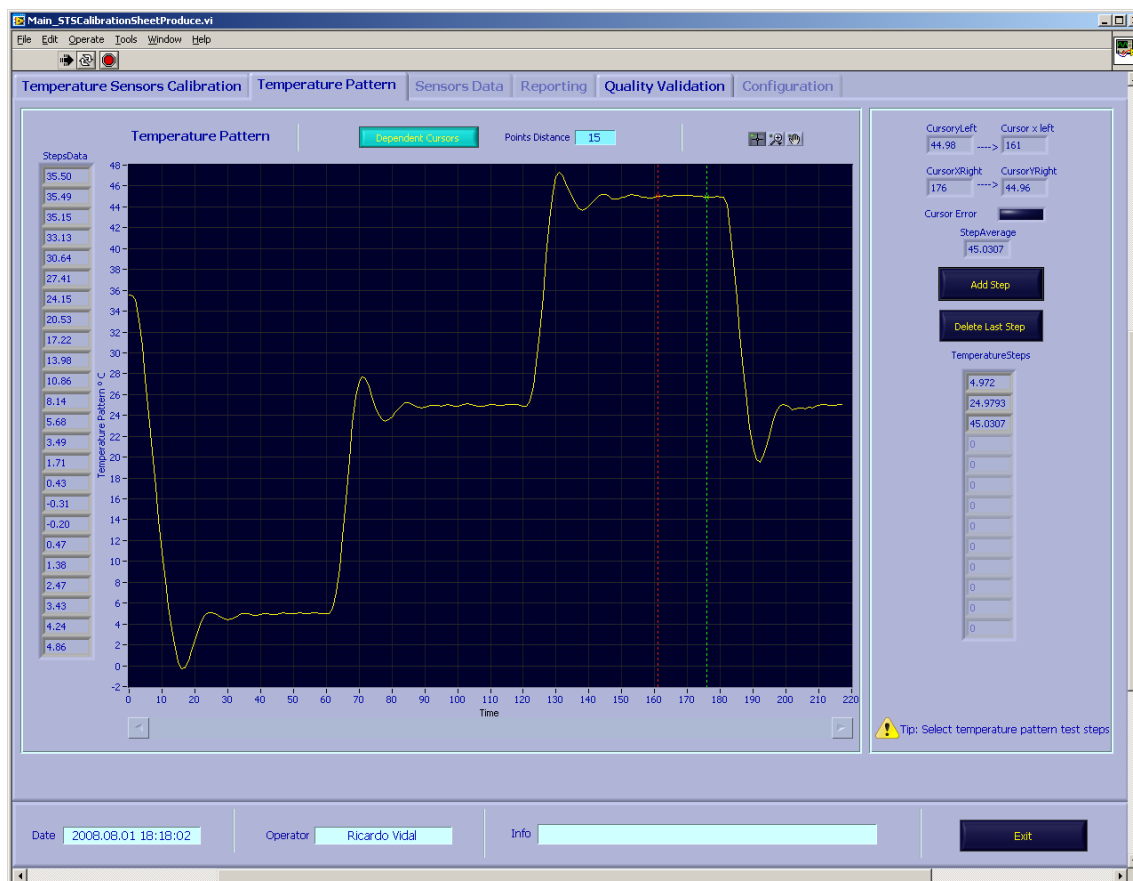


Figura 5.13 - Tab para definição dos valores reais médios dos patamares padrão de temperatura no QuV.

Uma vez mais, o utilizador após a definição do valor real médio de cada patamar da temperatura submetida, terá que seleccionar graficamente (cursor Left e cursor Right) criteriosamente o intervalo válido em cada patamar para cada sensor (ver Figura 5.13) tendo em atenção a estabilização após o overshoot proveniente da transição entre cada um dos três patamares.



Figura 5.14 - Tab para análise e selecção dos patamares da resposta dos sensores temperatura QuV.

Desta vez, o resultado obtido dos sensores é já em temperatura absoluta, em graus Célsius (ver Figura 5.14). Para cada um dos sensores, será realizada uma análise de modo a garantir-se um erro máximo de medição não superior ao definido para o sensor em causa, havendo assim uma triagem final, que garanta os mais altos padrões de qualidade. O anterior registo na base dados no servidor é actualizado com os valores máximos de erro obtidos pela etapa QuV, havendo assim um historial válido e actualizado.

«Fim do anexo 2»

Anexo 3

Tabela 5.1 — Lista de dados obtidos experimentalmente provenientes do ensaio 1 do sistema de calibração FSBlockCalibrator protótipo nº1

Ensaio arrefecimento		Início (t=0 min, T=25.44 °C)		Aumento valor tensão (t=7 min, T=9.70 °C)		Aumento valor tensão (t=11 min, T=6.6 °C)		Aumento valor tensão (t=14 min, T=5.9 °C)		Determinação da temperatura mínima (t=18min, T=5.71)
Grandezas	Valor Tensão (V)	Valor Corrente (A)	Valor Tensão (V)	Valor Corrente (A)	Valor Tensão (V)	Valor Corrente (A)	Valor Tensão (V)	Valor Corrente (A)		
Fonte Tensão DC Par 4	14.00	3.32	15.00	2.93	16.00	3.12	16.50	3.21		
Fonte Tensão DC Par 3	14.00	3.24	15.00	2.90	16.00	3.08	16.50	3.15		
Fonte Tensão DC Par 2	14.00	3.06	15.00	2.90	16.00	3.07	16.50	3.15		
Fonte Tensão DC Par 1	14.00	2.95	15.00	2.95	16.00	3.08	16.50	3.11		
Ensaio aquecimento		Inversão corrente para aferição temperatura máxima (t=20 min, T= 5.71°C)		Aumento valor tensão (t=25 min, T=57.40 °C)		Aumento valor tensão (t=32 min, T=86.59 °C)				
Grandezas	Valor Tensão (V)	Valor Corrente (A)	Valor Tensão (V)	Valor Corrente (A)	Valor Tensão (V)	Valor Corrente (A)	Determinação da temperatura mínima (t=43min, T=105.68)			
Fonte Tensão DC Par 4	10.00	1.96	14.50	2.30	16.00	2.26				
Fonte Tensão DC Par 3	10.00	1.88	14.50	2.26	16.00	2.24				
Fonte Tensão DC Par 2	10.00	1.95	14.50	2.27	16.00	2.23				
Fonte Tensão DC Par 1	10.00	1.61	14.50	2.28	16.00	2.20				

«Fim do anexo 3»

Anexo 4

Tabela 5.2 — Cálculos para a determinação da incerteza expandida associada à calibração sensores temperatura baseados em redes de Bragg

Fontes de incerteza	Grandeza entrada		Tipo	Inc. padrão da fonte - $u(x_i)$		sens c_i	contribuição - $u_i^2(y)$		Grau Lib. - v_i
Exactidão do padrão de temperatura (PRT)	0.01000	°C	R	0.00577	°C	1	0.0000	°C ²	50
Exactidão do ReadOut (Ohmímetro@100ohm)	0.00150	Ohm	R	0.00087	Ohm	2.544529	0.0000	°C ²	50
Exactidão da unidade medição comprimento onda	1.00000	pm	R	0.57735	pm	0.1	0.0033	°C ²	50
Estabilidade volume interior calibrador	0.40000	°C	R	0.23094	°C	1	0.0533	°C ²	50
						$u^2(y)$	0.0567	°C ²	
						$u(y)$	0.238127814	°C	
						v_{ef}	56.30146832		
						k	2.045638443		
						$U (+/-)$	0.487123411	°C	

Grandeza de entrada	Tipo
Distribuição Rectangular - Tolerância para 100% dos casos	R
Distribuição Normal - Tolerância para 95% dos casos	N
Distribuição Triangular - Tolerância para 100% dos casos	T
Desvio padrão da amostra	A

$k=INVT(0,0455;V_{ef})$
 $U=k*u(y)$

$u(x_i)$ = incerteza do padrão da fonte normalizada (R: $a/\sqrt{3}$ ou T: $a/\sqrt{6}$ ou N: $c/2$)
 U = incerteza expandida (i.e. para uma probabilidade de 95%), $U=k*u(y)$
 v_i = grau liberdade
 k = factor de cobertura, $k=INVT(0,0455;V_{ef})$
 V_{ef} = grau de liberdade (equação Welch-Satterthwaite)
 $Sens\ c_i$ = sensibilidade referente ao °C

«Fim do anexo 4»

Anexo 5

Calibrador Ametek JOFRA ATC



Specification Sheet SS-CP-2285-0600
June 2000
Issue 1

JOFRA™ ATC Series Dry Block Temperature Calibrators

- Temperature Ranges**
 - ATC-155 -24° to 155°C (-11° to 311°F)
 - ATC-320 50° to 320°C (122° to 608°F)
 - ATC-650 50° to 650°C (122° to 1202°F)
- Dual-Zone Heating Block**
 - Ensures Temperature Homogeneity Throughout the Block
 - Performance Equivalent to Liquid Temperature Bath
- Enhanced Accuracy and Stability**
 - Built-in External Reference Sensor
 - MVI Circuitry Ensures Stability Despite Mains Supply Variations
- Universal Inputs**
 - Handles Multiple Type Temperature Sensors
 - No Need for Multiple Instruments
- Automatic, Stand-Alone Calibration System**
 - Upload/Download Your Calibration Routines

PRODUCT DESCRIPTION

The JOFRA™ ATC Series (Advanced Temperature Calibrators) combine the accuracy of laboratory calibrators with the speed and portability of dry block calibrators. They feature an improved design for optimum performance and temperature homogeneity throughout the block.

The ATC Series calibrators are available in three different temperature ranges and each version in two models, A and B.

The ATC-155 features improved Peltier elements that use a "Multi-Stage Technology" that improves the efficiency, and extends the life of the heating/cooling block.

The ATC-320 and ATC-650 models feature an innovative dual zone heating block designed for optimum performance and superior temperature homogeneity throughout the block. This new design delivers performance equivalent to a liquid temperature bath.

Each ATC dry-block calibrator may be used to perform fully automatic calibration routines without the use of an external computer. Use the computer for full upload and download capabilities. Units may also be supplied with an input for an external reference sensor and inputs for sensor under test. All ATC calibrators feature RS232 serial communication interface.

FUNCTIONAL COMPARISON

Functions	ATC-155 A	ATC-155 B	ATC-320 A	ATC-320 B	ATC-650 A	ATC-650 B
Multi-Stage Peltier Heating Block	•	•				
Dual Zone Heating Block			•	•	•	•
MVI - Mains Variance Immunity			•	•	•	•
Stability Indicator	•	•	•	•	•	•
Automatic Step Function	•	•	•	•	•	•
Calibration Software Included	•	•	•	•	•	•
RS232 Communications	•	•	•	•	•	•
Display Resolution 0.01°	•	•	•	•	•	•
Output for "Calibrator is Stable"	•	•	•	•	•	•
Insert Storage Compartment	•	•	•	•	•	•
Downloading of Calibration Work Orders (Up to 20)	•		•		•	
Uploading of Calibration Result to Personal Computers	•		•		•	
Input for RTD, TC, V, mA, Switch	•		•		•	
24VDC Transmitter Supply	•		•		•	
Reference Sensor Input	•		•		•	
Automatic Switch Test	•		•		•	



- 1 -

Figura 5.15 – Brochura do sistema de calibração Ametek, sérieJOFRA, modelo ATC155.

«Fim do anexo 5»

Anexo 6

Algoritmo *AutomaticStabilitySearch.vi*.

O algoritmo apresentado na Figura 5.16, tem como objectivo a selecção de fracção de patamares de dados, com automatização da detecção da estabilidade.

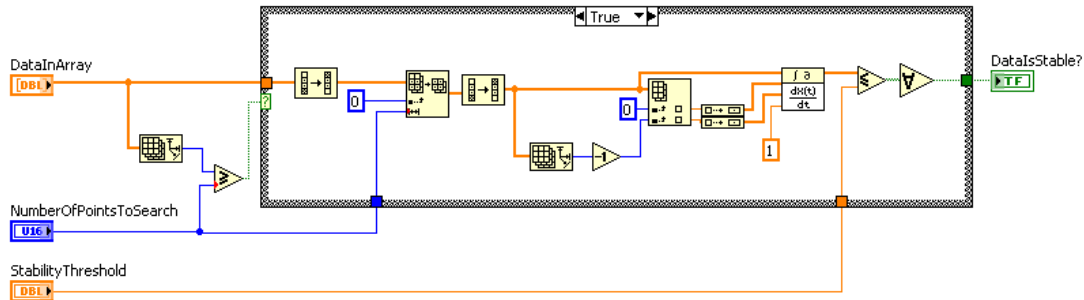


Figura 5.16 - Algoritmo para detecção automática de estabilidade num patamar de dados.

O algoritmo foi submetido a um ensaio para a sua validação. A Figura 5.17 esquematiza o perfil de dados submetido ao algoritmo, tendo este sido capaz de detectar a estabilidade de cada patamar, retirar a fracção de dados e ser imune aos pontos intermédios entre patamares (transientes). O algoritmo necessita que os seguintes parâmetros sejam ajustados à medida das necessidades da sua aplicação:

- i) Para o parâmetro *NumberOfPointsToSearch* - este parâmetro representa o número de dados da fracção do patamar que é considerado para a média de valores de cada patamar, a realizar posteriormente;
- ii) Para o parâmetro *StabilityThreshold* - este parâmetro representa a tolerância máxima permitida do valor de variação da derivada.

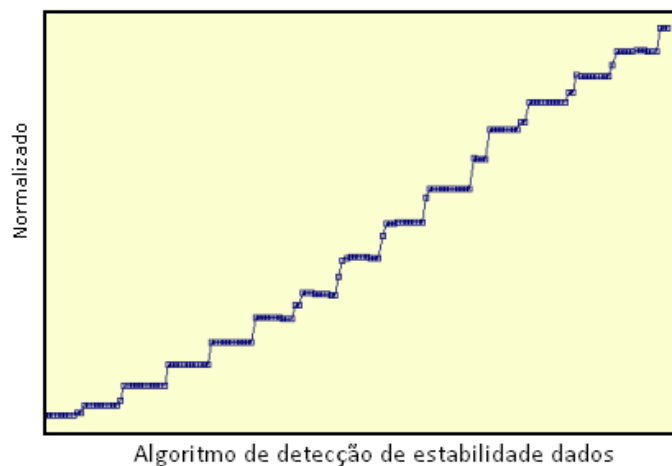


Figura 5.17 - Apresentação de resultado de teste feito ao algoritmo.

«Fim do anexo 6»