

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

Rui Miguel Dias Moreira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Fernando Gomes de Almeida

Orientador no INEGI: Eng. João Paulo Pereira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Automação

Junho de 2016

À minha família

Resumo

Os processos de fabrico aditivo encontram-se atualmente em desenvolvimento exponencial, tendo já proliferado para além do ambiente industrial, com a criação de impressoras 3D para uso doméstico. Contudo, é no setor industrial que as aplicações de maior interesse se têm desenvolvido, onde se requer uma maior precisão dos equipamentos, principalmente no âmbito do aperfeiçoamento dimensional, otimização das matérias-primas e aumento da cadência de produção.

A presente dissertação surgiu da necessidade de aprimoramento da impressora 3D FDM disponível no INEGI, de forma a permitir o processamento de termoplásticos de elevado desempenho (como o PEEK, o PEI, o PPS ou o PI), os quais são bastante apelativos em aplicações que requerem elevadas propriedades mecânicas, como na indústria aeroespacial e automóvel. Os referidos polímeros apresentam temperaturas de processamento algo mais elevadas que os polímeros atualmente aceites pela máquina, (discrepância esta que pode ser superior a 200°C) ao contrário da temperatura de decomposição que parece manter-se relativamente constante. Esta conjuntura leva a uma diminuição da gama de temperaturas às quais se pode operar e levanta a necessidade de melhorar o controlo da potência fornecida ao extrusor, que deve ser capaz de fundir totalmente o material extrudido, garantindo, no entanto, que este não se decomponha. O objetivo deste trabalho consiste em conceber um sistema de medição de temperatura que, em conjunto com o sistema de controlo térmico da impressora 3D, garanta a integridade dos termoplásticos aquando da sua extrusão. O sistema de medição deve ser não invasivo, com o propósito de evitar qualquer interferência com o processo de deposição.

As soluções apresentadas para melhorar o desempenho do sistema de controlo térmico envolvem a monitorização direta da temperatura de extrusão do próprio termoplástico. Atualmente, esta é parcialmente controlada em malha aberta por meio de termopares que medem a temperatura do bloco de aquecimento do extrusor, sendo expectável que esta não coincida exatamente com a temperatura do plástico extrudido. No sentido de se obter esta temperatura com exatidão e em tempo real, as duas soluções tratadas envolvem, respetivamente, a introdução de um pirómetro e de uma câmara termográfica, tanto a nível físico como no controlador da máquina em análise. Garantiu-se que estes sistemas de medição apresentavam resolução espacial suficiente para discriminar espessuras até 100µm, (que correspondem à espessura do filamento do plástico a medir), em conjunto com uma ampla gama de medição de temperaturas, já que estes termoplásticos podem ser extrudidos a temperaturas superiores a 400°C. Foram ainda previstos os sistemas de refrigeração necessários para salvaguardar a integridade dos instrumentos introduzidos, tendo em conta as altas temperaturas de operação que se prevê que ultrapassem os valores limite estabelecidos pelo fabricante.

Concluiu-se que ambas as soluções eram capazes de satisfazer os requisitos estabelecidos para a impressora 3D FDM na qual se propôs a implementação do sistema de medição, a Kühling&Kühling RepRap Industrial. Mostrou-se a adequabilidade dos instrumentos selecionados para a aplicação, que, aliada uma baixa inércia do conjunto e uma elevada proximidade requerida entre o sensor e o polímero extrudido, possibilita medições precisas da temperatura de extrusão do polímero sem ocorrência de interferências e sem danificar nenhum componente do sistema. A monitorização e controlo da temperatura de extrusão do polímero possibilitado com este trabalho, facilitados pela ampla interface de comunicações disponibilizada pelo sistema de medição, permitirão um controlo térmico mais rigoroso que o atualmente praticado em malha aberta pela maioria das impressoras 3D, contribuindo, como desejado, para o sucesso da integração dos plásticos de alto desempenho na impressão tridimensional.

Conceiving a non-contact measurement system for the polymer temperature at the nozzle exit of a FDM 3D printer

Abstract

Additive Manufacturing processes are undergoing a remarkable outgrowth abroad the industrial environment, as exemplified by the use of 3D printers for domestic purposes. However, it is inside Industry, where more accurate devices are needed, that those processes present higher usefulness, namely when used to improve dimensional accuracy, feedstock optimization and production rate.

The present work emerged from the need to upgrade the 3D printer available at INEGI's facilities, in order to process high-performance thermoplastics (like PEEK, PEI or PI), which are especially engaging when the best mechanical properties are required, as in aerospace and automotive industry. The plastics needed for that purpose have a higher melting point temperature when compared to the traditional polymers (a difference that can be above 200°C), in opposition to the decomposition temperature that remains relatively similar. These facts lead to a shortening of the temperature range suitable for the printer operation and raises the need for an improved control of the power provided to the extruder, which must allow the fully melt of the extruded material but still ensure that it doesn't decompose.

The aim of this work is to conceive a method that together with the thermal control system of the 3D printer allows the measurement of the thermoplastic extrusion temperature and ensures its integrity while being extruded. The measurement system must be non-invasive, so it doesn't interfere with the deposition process.

The solutions suggested in this thesis to improve the performance of the thermal control system include the direct monitoring of the thermoplastic extrusion temperature. Currently, this is partially controlled in open loop by thermocouples that measure the heating block temperature of the extruder, which is believed to be not the exact temperature of the plastic. In order to obtain an accurate and real-time temperature, the solutions involve either the insertion of a pyrometer or a camera, both in the specified printer and in its control system. It was confirmed that those systems present a spatial resolution small enough to discriminate up to 100µm-thickness differences (which matches the thickness of the targeted plastic) and a wide range of measurable temperatures, given that these thermoplastics may achieve temperatures above 400°C. Concerning the fact that the foreseen high temperatures may exceed the values established for the measuring instruments, refrigeration systems are required to ensure the integrity of the devices were also foreseen.

It was concluded that both solutions were able to satisfy the requirements of the targeted 3D FDM printer, specifically the Kühling&Kühling RepRap Industrial. The utmost importance of the devices accuracy together with a high proximity between the sensor and the extruded polymer and a low inertia of this set reveal the suitability of these solutions. The monitoring and the control of the extrusion temperature afforded with the present work, were favoured by the wide interface of communication provided by the measurement system, allow a more accurate thermal measurement than the one performed in open loop by most of the current 3D printers. Therefore, that control may help, as it was initially aimed, to achieve the inclusion of the high performance thermoplastics in 3D printing operations.

Agradecimentos

Na realização desta dissertação, contei com o apoio de várias pessoas sem as quais este trabalho não teria sido possível de realizar.

Ao Prof. Fernando Gomes de Almeida e ao Eng. João Paulo Pereira, meu orientadores, agradeço toda a disponibilidade ao longo deste percurso, bem como o conhecimento transmitido e motivação, essenciais para o sucesso deste trabalho.

A todos os que me são próximos, que caminharam comigo neste percurso com entejuda e amizade.

A toda a minha família, pelo apoio incondicional, proporcionando todas as condições para completar a minha formação de forma bem sucedida.

Esta tese foi desenvolvida com o apoio da operação NORTE-01-0145-FEDER-000022 – SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Fabrico aditivo no INEGI	2
1.3	Objetivos do projeto.....	3
1.4	Método seguido no projeto	3
1.5	Estrutura da dissertação	3
2	Enquadramento	5
2.1	Processo de Fabrico Aditivo	5
2.2	FDM - Fused Deposition Modeling	9
2.2.1	Características do processo FDM	10
2.2.2	Aplicações da tecnologia FDM.....	11
2.2.2.1	Ferramentas e moldes.....	11
2.2.2.2	Produção de peças de volume reduzido	12
2.2.2.3	Reparação de componentes	13
2.2.2.4	Engenharia Biomédica	13
2.2.2.5	Indústria automóvel e aeroespacial	13
3	Definição do Problema	15
3.1	Projeto RepRap	15
3.2	Impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial.....	16
3.2.1	Introdução de plásticos de alta-performance no processo FDM.....	17
3.2.2	Monitorização da temperatura de deposição do plástico	19
3.2.3	Limitações geométricas	20
3.2.4	Limitações de desempenho	21
4	Medição de Temperatura Sem Contacto.....	23
4.1	Radiometria.....	23
4.1.1	Espectro de radiação eletromagnética.....	24
4.1.2	Fundamentos físicos de radiação	24
4.2	Transdutores.....	28
4.2.1	Transdutores térmicos	28
4.2.1.1	Conjunto de termopares de radiação	29
4.2.1.2	Transdutores piroelétricos	29
4.2.1.3	Bolómetros	30
4.2.2	Transdutores de fotões	30
4.3	Calibração e determinação da temperatura de um corpo	31
4.3.1	Influência do ambiente.....	32
4.3.2	Determinação experimental da emissividade.....	33
4.3.2.1	Recurso a termopares	33
4.3.2.2	Criação de um corpo negro de teste	34
4.3.2.3	Referência de uma emissividade conhecida.....	34
4.3.3	Calibração geométrica do sistema de medição	34
4.3.4	Definição da lente	35
4.4	Família de pirómetros de radiação	37
4.4.1	Pirómetros de espectro	37
4.4.2	Pirómetros de banda.....	37
4.4.3	Pirómetros de radiação total.....	38
4.4.4	Pirómetros de rácio	38
4.4.5	Pirómetros multi-wavelength.....	39
4.4.6	Pirómetros de fibra ótica.....	39
4.5	Câmaras termográficas.....	41

4.6	Outros métodos de medição de temperatura sem contacto	43
4.6.1	Análise do índice refrativo	43
4.6.2	Fluorescência induzida por laser	44
4.6.3	Espectroscopia de emissão/absorção	44
4.6.4	Método Line Reversal	45
4.6.5	CARS – Coherent Anti-Stokes Raman Scattering	45
4.6.6	DFWM – Degenerative four wave mixing	45
4.6.7	Termografia acústica	46
5	Soluções Desenvolvidas	47
5.1	Primeira Solução	47
5.1.1	Sistema de medição da temperatura	49
5.1.2	Instalação do sistema	50
5.1.3	Implementação do sistema de controlo	56
5.2	Segunda Solução	58
5.2.1	Sistema de medição da temperatura	59
5.2.2	Instalação do sistema	62
5.2.3	Implementação do sistema de controlo	68
5.3	Avaliação das soluções	71
6	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro	73
6.1	Conclusões finais	73
6.2	Trabalhos futuros	74
7	Referências	75
8	Bibliografia	79

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Distribuição das diferentes aplicações de impressoras 3D	5
Figura 2.2 – Etapas de um processo de fabrico aditivo genérico	6
Figura 2.3 – Passos do processo de foto-polimerização camada-a-camada	6
Figura 2.4 – Processo de fabrico aditivo por <i>Binder Printing</i>	7
Figura 2.5 – Representação de uma solução habitual de <i>Powder Bed Fusion</i> por sinterização..	7
Figura 2.6 – Representação genérica de um processo de fabrico aditivo por tecnologia DED..	8
Figura 2.7 – Esquema representativo do processo de fabrico aditivo DW.....	8
Figura 2.8 – Princípio de funcionamento de uma impressora 3D FDM.....	10
Figura 2.9 – Peça em ABS criada para experiência de injeção em molde e conjunto final	12
Figura 2.10 – Exemplos de produtos finais fabricados pelo processo FDM.....	12
Figura 3.1 – Distribuição do mercado pelos fabricantes de impressoras 3D FDM.....	16
Figura 3.2 - Impressora tridimensional FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial	16
Figura 3.3 – Relação entre a temperatura de fusão de plásticos para extrusão e a respetiva gama de temperaturas de operação.....	18
Figura 3.4 - Computador <i>single-board</i> BBB e a sua respetiva interface.....	19
Figura 3.5 – Cabeça de extrusão móvel da impressora 3D FDM Kühling&Kühling	21
Figura 3.6 – Modelos disponíveis de bicos extrusores e o respetivo diâmetro do furo	21
Figura 4.1 - Espectro eletromagnético e respetiva gama detetável por pirómetros.....	24
Figura 4.2 – Distribuição espectral do poder emissivo de um corpo negro	25
Figura 4.3 – Comparação entre o poder emissivo de um corpo negro, cinzento e real.....	26
Figura 4.4 - Radiação emitida, refletida e transmitida por um corpo dito real.....	27
Figura 4.5 - Erros de medição com emissividade definida a 10%	27
Figura 4.6 – (a) Transdutor térmico; (b) circuito elétrico análogo.....	28
Figura 4.7 – Esquematização de um conjunto de termopares	29
Figura 4.8- Transdutor piroelétrico: (a) Esquema da secção de corte; (b) Componente piroelétrico; (c) Circuito elétrico análogo	30
Figura 4.9 – Representação esquemática de um bolómetro, onde a radiação incide sobre a placa absorvora.....	30
Figura 4.10 - Representação típica de um transdutor de fotões.....	31
Figura 4.11- Transmissividade espectral do ar.....	32
Figura 4.12 – Exemplo de um diagrama ótico de um pirómetro.....	34
Figura 4.13 - Geometria de calibração oficial para pirómetros.....	35
Figura 4.14 - Aplicação alternativa da geometria de calibração	35
Figura 4.15 – Relação entre a superfície do objeto e o diâmetro de medição.....	36
Figura 4.16 – Transmissividade de materiais tipicamente usados em sistemas de medição IV (1mm de espessura)	36
Figura 4.17 - Diagrama de blocos ilustrativo do funcionamento de um pirómetro.....	37

Figura 4.18 – Principais componentes de um pirómetro de banda.....	38
Figura 4.19 - Recurso a lentes ou espelhos de forma a focar radiação na lente	38
Figura 4.20 - Estrutura típica de pirómetro de fibra ótica	40
Figura 4.21 - Secção longitudinal de um cabo de fibra ótica	40
Figura 4.22 – Sistema básico de digitalização bidimensional para um único transdutor	41
Figura 4.23 – Exemplo de uma câmara IV com LCD (<i>Flir E4</i>).....	42
Figura 4.24 – Esquema de um interferómetro de Mach-Zehnder.....	43
Figura 4.25 – Espectro de emissão do H ₂	44
Figura 4.26 – Espectro de absorção do H ₂	44
Figura 4.27 - Técnica de <i>line reversal</i> para medição de temperatura de um gás	45
Figura 4.28 – Esquema de um dispositivo de medição de temperatura CARS.....	45
Figura 5.1 – Transmissividade espectral de alguns polímeros e respetivas gamas ideais de medição.....	48
Figura 5.2 – Pirómetro Optris CTfast LT	49
Figura 5.3 – Relação D:S da lente <i>Close Focus</i> com resolução ótica 25:1	50
Figura 5.4 – Acoplamento da lente <i>Close Focus</i> no pirómetro CTfast LT	51
Figura 5.5 – Relação geométrica entre o pirómetro, o respetivo D:S e a ponteira de 0.75mm fornecida pelo fabricante de impressora 3D Kühling&Kühling.....	51
Figura 5.6 – Modelação do novo bico da impressora, compatível com o pirómetro da primeira solução	52
Figura 5.7 – Disposição geométrica do pirómetro CTfast LT com o novo bico modelado	52
Figura 5.8 – Placa de refrigeração a água de um elemento da cabeça da impressora 3D FDM Kühling&Kühling	53
Figura 5.9 – Peça que permite o acoplamento do suporte do pirómetro à cabeça da impressora 3D	53
Figura 5.10 – Geometria do suporte do pirómetro e respetivo acoplamento	54
Figura 5.11 – Cabeça da impressora 3D com o pirómetro e respetiva geometria de suporte instalados	54
Figura 5.12 – Sistema de refrigeração do pirómetro integrado na geometria de suporte	55
Figura 5.13 – Calha porta-cabos articulada da cabeça da impressora	55
Figura 5.14 – Parafusos que viabilizam o acoplamento de um suporte do pirómetro amovível	56
Figura 5.15 – Complementação do sistema de controlo atual da impressora 3D por integração do pirómetro	56
Figura 5.16 – Placa da componente eletrónica e respetiva alocação da plataforma da interface digital	57
Figura 5.17 – Gráfico temporal o sinal de saída do pirómetro com e sem smart averaging, respetivamente	57
Figura 5.18 – Câmara termográfica da Optris PI 450 G7.....	59

Figura 5.19 – Cálculo da relação entre a distância focal e o FOV da câmara termográfica PI 450 G7	60
Figura 5.20 – Ambiente gráfico do <i>software</i> PI Connect	61
Figura 5.21 - Relação geométrica da câmara PI 450 G7 em relação à impressora 3D Kühling&Kühling	62
Figura 5.22 – Alcance de ambos os bicos da impressora 3D por parte do campo de visão da câmara PI 450 G7	63
Figura 5.23 – Versão mais compacta do <i>Cooling Jacket</i> da <i>Optris</i> e respetivo suporte de montagem	63
Figura 5.24 – Desequilíbrio do sistema causado pelo <i>Cooling Jacket</i>	64
Figura 5.25 – Geometria da caixa refrigeradora para a PI 450 G7	64
Figura 5.26 – Serpentina de refrigeração da proposta de caixa de proteção térmica da PI 450 G7	65
Figura 5.27 – Alojamento da câmara PI 450 G7 na caixa de refrigeração	65
Figura 5.28 – Vista explodida do conjunto PI 450 G7 e caixa de refrigeração	66
Figura 5.29 - Relação geométrica da caixa de refrigeração da câmara PI 450 G7 em relação à impressora 3D	66
Figura 5.30 – Tampas da componente ótica da PI 450 G7	67
Figura 5.31 – Cabeça da impressora Kühling&Kühling e respetivo sistema de guiamento do eixo XX	68
Figura 5.32 - Complementação do sistema de controlo da impressora 3D por integração da câmara termográfica	68
Figura 5.33 – Diagrama da sequência de processos a implementar com a introdução do sistema de medição térmica	69

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Tabela resumo dos diferentes processos de fabrico aditivo.....	9
Tabela 2.2 – Tabela resumo da gama de materiais admitido pelo FDM e respetivas propriedades mecânicas.....	11
Tabela 3.1 – Materiais para aplicação aeroespacial e respetivas propriedades	17
Tabela 4.1 – Materiais utilizados em lentes de sistemas de medição IV e respetivas propriedades	36
Tabela 4.2 – Comparação entre diferentes configurações de cabos de fibra ótica.....	41
Tabela 4.3– Irradiação e contraste para diferentes comprimentos de onda em corpos à temperatura ambiente	42
Tabela 5.1 – Especificações do pirómetro CTfast LT	49
Tabela 5.2 – Especificações da câmara termográfica PI 450 G7	59
Tabela 5.3 – Geometrias disponíveis no PI Connect para áreas de medição da temperatura da imagem termográfica.....	70
Tabela 5.4 – Comparação das especificações das soluções propostas	71
Tabela 5.5 – Matriz de avaliação das soluções propostas	72

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Os processos de fabrico aditivo encontram-se atualmente numa fase singular de desenvolvimento. A possibilidade de fabricar peças por este processo não apenas para prototipagem, mas também como produtos finais prontos a comercializar, começou a despertar o interesse de investimento das mais variadas indústrias, desencadeando, pela relação oferta-procura, uma investigação mais exaustiva que leva a uma constante inovação neste campo.

O aspeto mais apelativo destes processos aditivos tem que ver com a rentabilização máxima das matérias-primas, já que não existem desperdícios de material, ao invés do que se sucede na maioria dos processos de fabrico subtrativo. Por outro lado, o facto de ser apenas necessária a modelação tridimensional da peça desejada e transferência do respetivo ficheiro para a máquina, em acréscimo à possibilidade desta poder conceber o produto apenas num único processo automático, faz com que o fabrico aditivo seja um investimento polivalente que pode facilmente trazer um elevado retorno.

Incidindo sobre os fundamentos do INEGI, que envolvem a investigação científica e a inovação tecnológica, o desenvolvimento da impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial, na conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura de extrusão do polímero, é um projeto relevante na unidade de fabrico aditivo deste centro de inovação que unifica o ambiente académico e industrial.

A ambição de usufruir desta tecnologia para singrar na indústria automóvel e aeroespacial, através do fabrico aditivo de produtos finais competitivos no mercado, despoleta a necessidade de processar plásticos de elevado desempenho de forma a constituírem peças com ótimas propriedades mecânicas e elevada precisão dimensional, aumentando a exigência da tecnologia envolvida, neste caso o *Fused Deposition Modeling*.

Vincando a magnitude do projeto, numa recente conferência em Orlando, Flórida, decorrida em paralelo com o desenvolvimento do presente trabalho, responsáveis pelo centro de pesquisa da NASA apresentaram uma investigação atual que envolve a manipulação de uma impressora 3D *open-source* no âmbito de produzir, por fabrico aditivo, peças em PEI (polieterimida) para aplicação aeroespacial, nomeadamente no SLS (*Space Launch System*), o foguetão mais potente que a NASA alguma vez construiu, o qual se espera que seja concluído e lançado em 2018. No entanto, a tecnologia desenvolvida até ao momento ainda não permite um fabrico totalmente fiável de peças em termoplásticos de alto desempenho, principalmente caso estas sejam de elevadas dimensões. É inegável a carência de um controlo fino de toda a termodinâmica e transferências de calor envolvidas no processo, podendo esta lacuna atual na tecnologia FDM ser reduzida por contribuição do presente trabalho [1].

1.2 Fabrico aditivo no INEGI

O INEGI é um Instituto de novas tecnologias, situado na interface Universidade – Indústria e vocacionado para a realização de atividade de investigação e de inovação de base tecnológica (I&I) e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do que são hoje os Departamentos de Engenharia Mecânica (DEMec) e de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos, o estatuto de “Utilidade Pública” e uma equipa própria de 200 colaboradores, assume-se como um agente ativo no desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado no conhecimento, na densidade tecnológica dos produtos e processos e na inovação de base tecnológica, nomeadamente nos diferentes processos de fabrico aditivo.

Utilizando a sua infraestrutura de suporte ao I&I (Sistema Nacional de Investigação e Inovação), o INEGI disponibiliza um conjunto de serviços de apoio à indústria para a prototipagem rápida de produtos e para o fabrico rápido de ferramentas, designadamente:

- Fabrico de protótipos por fabrico aditivo;
- Fabrico de protótipos e pré-séries de peças fundidas em aço e ligas de alumínio, níquel e titânio;
- Fabrico rápido de ferramentas;
- Fabrico de protótipos em materiais compósitos;
- Fabrico de componentes e estruturas em ambiente controlado (sala limpa).

No que respeita à impressão tridimensional de termoplásticos, assiste-se a uma proliferação de equipamentos de baixo custo destinados ao mercado doméstico com equipamentos capazes de processar os polímeros de mais baixo ponto de fusão, tipicamente ABS e PLA. Estes equipamentos dado o seu “target” de preço são equipados com sistemas de controlo de movimento alicerçados em soluções baseadas em placas *Arduino* ou equivalente e motores passo a passo o que conduz a precisões de funcionamento inferiores ao desejado com a conseqüente repercussão ao nível da qualidade e aspeto das peças produzidas. As características dos componentes produzidos não servem as especificações técnicas para um uso industrial e profissional ao nível de incorporação nos produtos finais. O INEGI tem vindo a desenvolver um trabalho de investigação e desenvolvimento no processamento de polímeros de elevado desempenho entendendo que existe um espaço de mercado muito significativo para o surgimento de equipamento capazes de processar termoplásticos de elevado ponto de fusão e desempenho, tal como o PEEK, PEI, PEKK ou PPS, eventualmente dopados ou reforçados com fibras curtas. Estes materiais são extremamente difíceis de processar pois para além de uma elevada temperatura de processamento, possuem janelas de parâmetros de processamento muito estreitas e elevado custo de matéria-prima, o que inibe a sua utilização em processos de fabrico aditivo. Os equipamentos de fabrico aditivo têm de ser equipados com câmaras e mesas aquecidas com controlo fino de temperatura e sistemas de gestão de temperatura do material a ser depositado. É no âmbito de aprimorar este controlo térmico que surge a presente dissertação.

Para além destes sistemas e uma vez que o sistema de medição a conceber, juntamente com os componentes de acionamento (guias, fusos, motores, entre outros), vão estar sujeitos a temperaturas elevadas, será necessário recorrer a sistemas de arrefecimento para manter a integridade destes componentes. Assim, é expectável que os termoplásticos de elevado desempenho produzidos por fabrico aditivo passem a ter um papel fundamental nos componentes de sistemas e equipamentos podendo ser utilizados diretamente em aplicações finais [2], [3].

1.3 Objetivos do projeto

A investigação desenvolvida neste trabalho prende-se com o objetivo de conceber um sistema de medição sem contacto da temperatura de extrusão do polímero na impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial presente no INEGI, de forma a melhorar o seu sistema de controlo a partir de uma monitorização térmica da temperatura do polímero em malha fechada.

A elaboração das soluções para o projeto envolve a seleção de instrumentos de medição da temperatura eficazes para medir de forma não invasiva a temperatura de filamentos plásticos em movimento, a proposta de instalação do sistema, válida tanto em termos geométricos como em termos de controlo, assegurando ainda todas as condições de funcionamento para serem cumpridos os requisitos de desempenho fundamentais para o sucesso do sistema de medição.

O desenvolvimento do presente projeto utiliza técnicas radiométricas, empregando sistemas de medição de elevada resolução que possibilitarão a introdução de plásticos de alto desempenho na impressora 3D analisada, ou noutra com a mesma tecnologia FDM, permitindo que o INEGI produza peças para aplicação na indústria aeroespacial a partir de um processo de fabrico aditivo, tal como é ambicionado por esta instituição.

1.4 Método seguido no projeto

Numa primeira abordagem à questão levantada pelo tema, foi realizado levantamento extensivo do estado da arte dos sistemas de medição de temperatura não-invasivos, nomeadamente das diferentes formas de deteção do sinal análogo à temperatura por parte do sensor, a sua conversão num sinal elétrico proporcional à temperatura por parte do transdutor e a sua forma de transmissão para o ambiente exterior ao instrumento por parte da interface.

Após ter uma ideia dos produtos existentes no mercado dos termómetros não-invasivos, realizou-se um enquadramento relativo à impressora tridimensional em estudo, desde a tecnologia associada ao processo de fabrico até aos materiais que utiliza e quais as aplicações das peças fabricadas. Paralelamente ao estudo tecnológico da impressora 3D FDM, procurou-se abordar de uma forma global todos os processos de fabrico aditivo presentes na indústria, de maneira a situar o processo referente à máquina estudada.

Após a obtenção de informação relativa à impressora tridimensional e ao leque de sistemas de medição térmica disponíveis para a integrar, foi necessário definir o problema e concluir sobre os requisitos despoletados pelas condicionantes da máquina para implementação do referido sistema de medição.

As soluções propostas para o presente projeto surgiram no cruzamento de toda a investigação descrita, selecionando um instrumento de medição da temperatura de extrusão e o seu modo de implementação em função do processo de fabrico da impressora 3D e das suas condicionantes geométricas, térmicas, de desempenho e de controlo.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em 6 capítulos, que a seguir se descrevem:

Após a presente introdução, o segundo capítulo apresenta o enquadramento da impressora tridimensional alvo de estudo nos processos de fabrico aditivo disponíveis na indústria. Analisando a impressora Kühling&Kühling mais detalhadamente, segue-se a descrição da tecnologia envolvida, os materiais processados por esta e as suas possíveis aplicações.

No terceiro capítulo da dissertação define-se o problema tratado e a sua relação com o projeto RepRap que apadrinha a mencionada impressora 3D. São referidos os objetivos do projeto e analisados de forma mais aprofundada os materiais que se pretende utilizar com a

introdução do sistema de medição térmica, tal como as condicionantes que estes vão impor. São também descritos todos os restantes requisitos para o sistema de medição, impostos pela máquina de fabrico aditivo.

No quarto capítulo é analisado, de forma quase exaustiva, o estado da arte dos sistemas de medição de temperatura não-invasivos, incluindo todas as variantes, as tecnologias envolvidas e as adaptações que devem ser feitas consoante a aplicação.

O quinto capítulo descreve as diferentes soluções alcançadas, incluindo o instrumento de medição selecionado, a sua forma de instalação na impressora 3D, a integração dos dados relativos à temperatura de extrusão no sistema de controlo e ainda uma avaliação final que contrapõe as diferentes soluções obtidas.

O sexto e último capítulo é relativo às conclusões da dissertação e às perspetivas de trabalhos futuros, parte delas já expectáveis no arranque do projeto e outras que apenas surgiram no decorrer da sua realização.

2 Enquadramento

2.1 Processo de Fabrico Aditivo

Correntemente denominado por prototipagem rápida no ramo da Engenharia Mecânica, o processo de fabrico aditivo tornou-se popularizado e conhecido no século XXI por impressão 3D, a partir da comercialização de impressoras tridimensionais para uso pessoal. O termo ‘prototipagem rápida’ é utilizado frequentemente na indústria para descrever um processo que rapidamente cria uma peça ou sistema por adição de material, a partir de informação digital, que representa um protótipo de um produto a ser futuramente comercializado.

O avanço tecnológico dos processos de fabrico aditivo, nomeadamente os realizados por adição de material por camadas, trouxe melhorias significativas ao nível da cadência de produção, propriedades dos materiais e precisão dimensional, o que permitiu o fabrico de produtos finais prontos a ser comercializados e não apenas de protótipos, o que levou ao termo ‘prototipagem rápida’ cair em desuso. Na Figura 2.1 é possível observar um gráfico representativo da diversidade de aplicações do processo de fabrico aditivo por camadas e a respetiva distribuição, relatando também a revista “*Sculpeo: The State of 3D printing*” um aumento significativo do ramo da produção por meio de impressoras 3D nos últimos anos, tanto na Europa como na América.

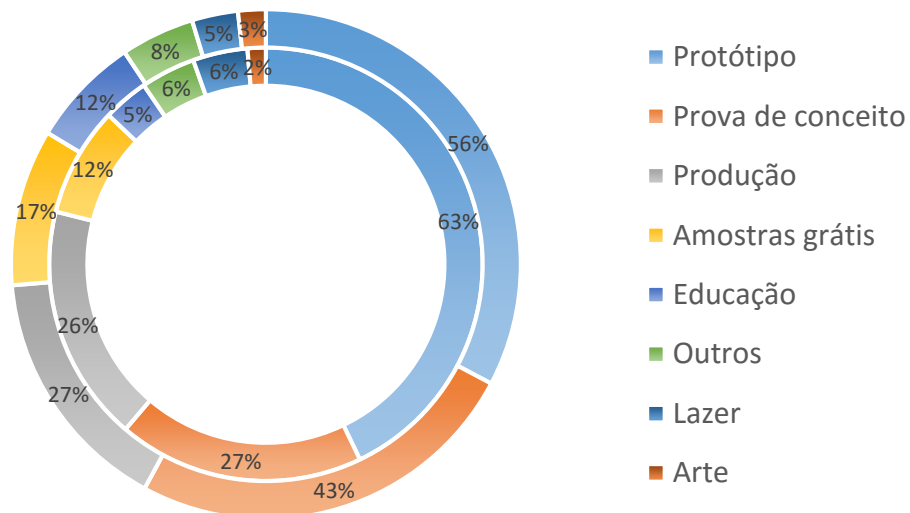


Figura 2.1 - Distribuição das diferentes aplicações de impressoras 3D (Europa: anel interior; América: anel exterior) [4]

Atualmente, o princípio básico do processo de fabrico aditivo é que um modelo gerado inicialmente por um *software* de modelação tridimensional (3D CAD) pode ser fabricado diretamente por uma impressora 3D, sem a necessidade prévia de elaborar um planeamento do processo. Embora este processo de fabrico simplifique muito a criação de peças que podem envolver bastante complexidade, na prática não podemos generalizar este princípio a todas as aplicações, já que alguns produtos requerem um acabamento posterior ou acoplagem de outros componentes [5].

O princípio de funcionamento baseia-se na adição de filamentos de material por camadas horizontais, mas a forma como são depositados pode variar de acordo com o tipo de impressora tridimensional. Existem ainda outros aspetos importantes que podem variar, nomeadamente o material que é depositado, como as camadas se ligam umas às outras ou a espessura dos filamentos e das camadas. Todavia, todas elas respeitam oito etapas comuns (Figura 2.2) na elaboração do respetivo produto final, podendo algumas ser omitidas consoante a aplicação.

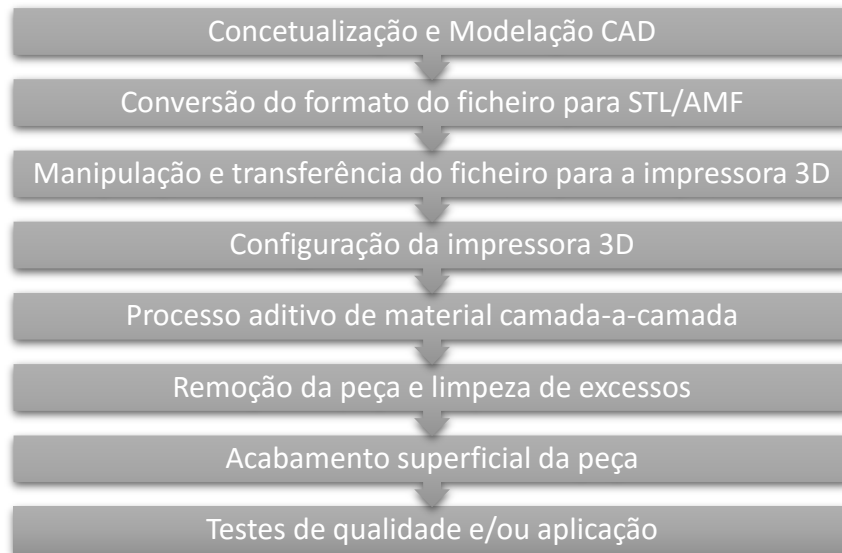


Figura 2.2 – Etapas de um processo de fabrico aditivo genérico

Seguem-se vários tipos de processos de fabrico aditivo baseado na deposição por camadas que se encontram atualmente presentes em ambiente industrial, que variam essencialmente na 4ª etapa da Figura 2.2:

- **Processos de foto-polimerização:** envolve a emissão de um feixe laser ultravioleta sobre resina foto-polimerizável que solidifica por irradiação eletromagnética. Após remoção dos excessos, a resina solidificada resulta na peça anteriormente modelada. O processo baseia-se na impressão camada-a-camada, tal como é descrito na Figura 2.3;

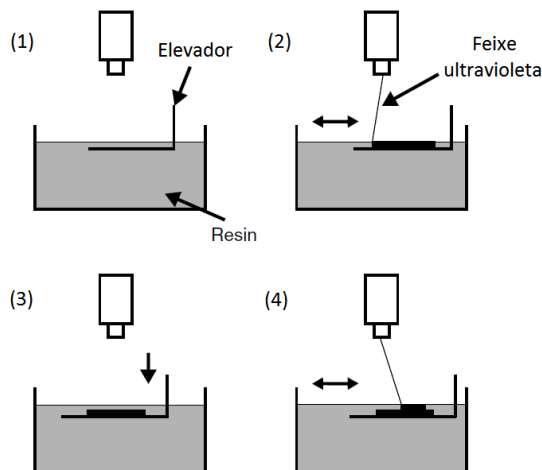


Figura 2.3 – Passos do processo de foto-polimerização camada-a-camada

- **Processos de extrusão:** baseia-se na extrusão de termoplásticos fundidos através de um orifício de reduzido diâmetro de maneira a depositar filamentos de material numa certa camada. Esta família de sistemas de fabrico inclui o FDM (Figura 2.8), processo inerente à impressora 3D *Kühling&Kühling* em estudo, que é descrito com mais detalhe na secção seguinte. Existem ainda outras variantes como o MJS (*Multiphase Jet Solidification*) e o MEM (*Melted Extrusion Modeling*);

- **Processos de laminagem:** sendo um dos primeiros processos de fabrico aditivo a ser comercializado, o LOM (*Laminated Object Manufacturing*) envolve a laminagem de chapas e corte via laser, de forma a que cada chapa represente uma camada da peça em corte transversal. A assemblagem das chapas por camadas pode ser anterior ou posterior ao respetivo corte e a fixação destas pode também variar conforme a solução do projetista: através de colas ou adesivos estruturais, soldadura ou brasagem.
- **Binder Printing:** tal como é visível na Figura 2.4, este processo envolve a deposição, pulverização ou impressão de gotículas de um aglutinante líquido num recipiente com um certo pó (*powder bed*), criando uma camada correspondente a uma secção transversal da peça que se pretende produzir, por junção de partículas do pó. Usualmente o pó utilizado, que acabará por ser o material constituinte dos produtos finais, é o gesso e o amido, mas atualmente já se concebem impressoras 3D com a possibilidade de criar peças cerâmicas ou metálicas por este processo;

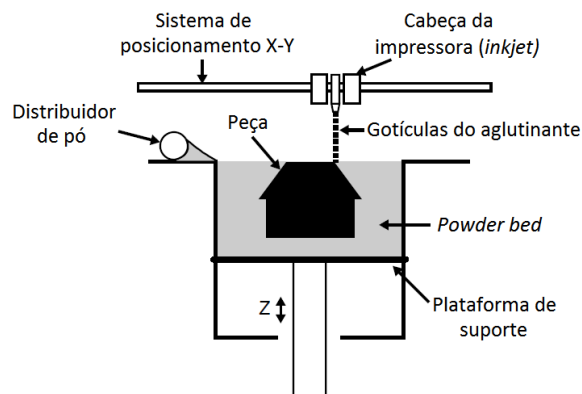


Figura 2.4 – Processo de fabrico aditivo por *Binder Printing*

- **Material jetting:** consiste na extrusão de material por meio de duas ponteiros da impressora, uma de deposição de micropartículas de um termoplástico e outra que contém um aglutinante. As camadas de termoplástico são depositadas uma-a-uma, sendo que entre elas se procede a uma remoção de cerca de $25\mu\text{m}$ de espessura para alisamento superficial, seguida da deposição do aglutinante que garante a coesão entre camadas;
- **Powder Bed Fusion:** processo que recorre a um recipiente preenchido com pó polimérico ou metálico, que é processado de forma seletiva por uma fonte de energia, geralmente um feixe de eletrões ou raio laser (Figura 2.5). Os componentes representados na figura devem-se encontrar isolados por uma câmara preenchida com gás inerte a uma temperatura controlada, que deve ser elevada mas não superior ao ponto de fusão do pó a sinterizar. Após se completar uma camada, um rolo efetua o nivelamento desta e então a plataforma desce o equivalente à sua espessura, para ser possível formar uma nova camada;

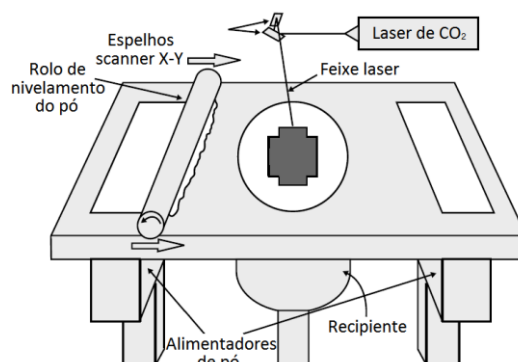


Figura 2.5 – Representação de uma solução habitual de *Powder Bed Fusion* por sinterização

- **Directed Energy Deposition:** referenciado na indústria de fabrico aditivo por DED, este processo consiste na deposição de material sob a forma de jato ou cordão, em simultâneo com a sua fusão (e do substrato onde vai ser depositado) por energia incidente, sendo ambos os fenómenos desencadeados por um único dispositivo. Esta tecnologia engloba vários processos de fabrico aditivo, todos eles incidentes na mesma metodologia, variando na forma de energia emitida e essencialmente no material de deposição, já que a indústria dispõe atualmente de mecanismos de DED para produzir componentes cerâmicos, poliméricos e compósitos metálicos, mas predominantemente peças metálicas por deposição de jatos de pó metálico (DMD – *Direct Metal Deposition*). Na Figura 2.6 é visível o método de deposição de filamentos camada-a-camada realizado por DED, onde o material é adicionado ao substrato por aquecimento via raio laser no ponto exato em que as ponteiros estão a incidir, método este muito similar ao *laser cladding* ou soldadura por arco de plasma (PAW);

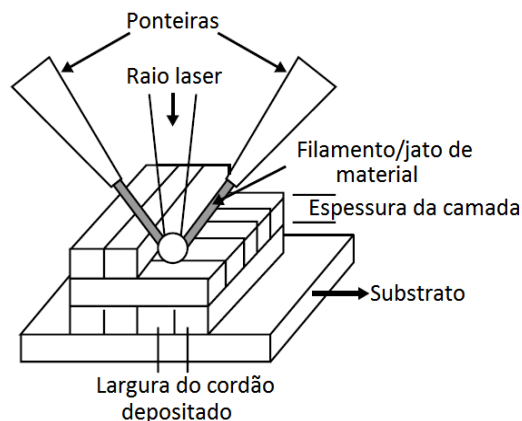


Figura 2.6 – Representação genérica de um processo de fabrico aditivo por tecnologia DED

- **Direct Write Eletronics:** a tecnologia DW baseia-se na impressão ativa ou passiva de circuitos eletrónicos a partir de um ficheiro digital, sem necessidade de revestimentos ou acabamentos superficiais adicionais. Através de uma cabeça móvel X/Y/Z programável deposita-se quantidades ínfimas de material (até 10 μ m de largura) de forma automática, com vista a criar circuitos elétricos ou outros dispositivos que envolvem microtecnologia. Na Figura 2.7 encontra-se esquematizado o processo aditivo DW, em que é possível incorporar semicondutores, polímeros dielétricos, metais condutores ou resistências em diversas superfícies, como plásticos, metais, cerâmicas, vidro ou mesmo tecidos, tornando-se um processo bastante útil em várias áreas de aplicação eletrónica, enfatizando a indústria de satélites e aeroespacial [6].

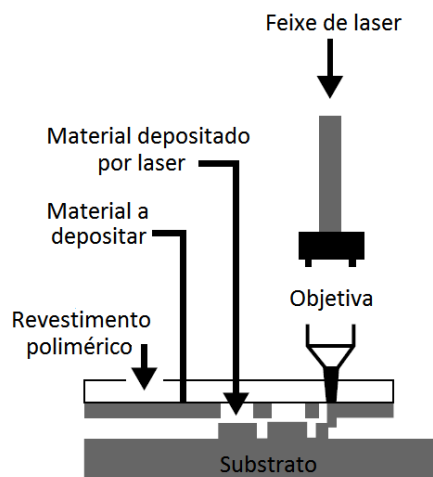


Figura 2.7 – Esquema representativo do processo de fabrico aditivo DW

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

Na Tabela 2.1 apresenta-se um resumo dos processos de fabrico aditivo anteriormente descritos, que contrapõe certos fatores influentes na tomada de decisão para o fabrico de um produto:

Tabela 2.1 – Tabela resumo dos diferentes processos de fabrico aditivo

	Foto-polymerização	Extrusão	LOM	Binder jetting	Material jetting	Powder Bed Fusion	DED	DW
Deposição	Resina foto-polimerizável	Extrusão de termoplástico	Chapa	Recipiente de pó	Injeção de pó	Injeção de pó	Injeção de material fundido	Fita com revestimento polimérico
Meio de transformação	Solidificação por laser ultravioleta	Fusão por condução térmica	Corte por laser	Gotículas de aglutinante	Injeção de aglutinante	Feixe de eletrões/Laser	Fusão por laser	Laser + objetiva
Materiais	Polímeros	•	•	•	•	•		
	Compósitos	•			•	•		
	Metais			•	•	•	•	
	Ligas metálicas			•			•	
	Cerâmicos	•			•	•		
	Moldes de areia		•		•	•		
	Papel			•				
	Eletrónicos							•

2.2 FDM - Fused Deposition Modeling

A tecnologia de impressão tridimensional por deposição de material fundido consiste no pré-aquecimento de material fornecido primariamente por uma bobina, geralmente de polímeros ou certos metais, de forma a permitir o seu fluxo até uma ponteira de extrusão de material, sendo esta normalmente constituída por uma cabeça móvel com um bloco de aquecimento, fundindo o material que seguidamente deposita de forma controlada, através de um orifício, num tabuleiro horizontal (Figura 2.8). Existe também uma outra solução disponível no mercado, em que o tabuleiro é que se move nos três eixos, encontrando-se a cabeça fixa. É comum as impressoras 3D FDM apresentarem dois orifícios distintos, permitindo o uso de dois materiais diferentes ou duas cores em simultâneo no mesmo objeto.

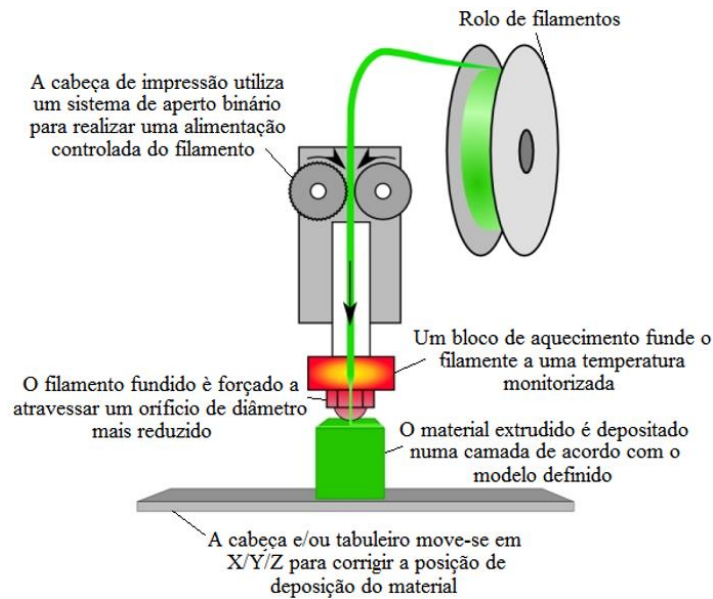


Figura 2.8 – Princípio de funcionamento de uma impressora 3D FDM

A ambiguidade das patentes deste processo de fabrico levou a que atualmente existam diversas variantes tecnológicas implementadas por diferentes empresas, nomeadamente a FFF (*Fused Filament Fabrication*) correspondente à impressora 3D em estudo, desencadeando uma maior proliferação e um desenvolvimento acrescido, paralelamente a redução abrupta dos preços devido à elevada competitividade. Este fenómeno permitiu uma redução abrupta do preço das impressoras 3D nos últimos anos tornando esta tecnologia acessível para uso pessoal. Posto isto, a indústria de conceção de impressoras tridimensionais tem adaptado os seus produtos para aplicação doméstica, desenvolvendo-os no sentido de melhorar a ergonomia e as dimensões da máquina, em paralelo com o desenvolvimento de interfaces de modelação de objetos para utilizadores menos qualificados.

Atualmente, a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais e a precisão dimensional que tem vindo a ser observada em certas impressoras 3D FDM permite a atuação em mercados diversificados, como o de dispositivos médicos, implantes dentários, joalheria ou mesmo na indústria aeroespacial, como se tem em vista com o desenvolvimento do presente projeto. Com a tecnologia de *Thermojet* a cair em desuso, surgiram novas soluções no processo de fabrico aditivo por extrusão de polímeros fundidos, nomeadamente deposição por um canal unidimensional por efeito piezoelétrico, enquanto um outro canal deposita um outro polímero com menor ponto de fusão que garante a coesão estrutural. Por outro lado, o facto dos orifícios de extrusão serem de diâmetro reduzido garante um maior nível de detalhe, em adição ao nivelamento das camadas depositadas realizado por corte planar, mas por outro lado reduzem a velocidade de fabrico das peças, que se considera lenta face à maioria dos processos aditivos conhecidos [7].

2.2.1 Características do processo FDM

Sendo a tecnologia amplamente mais utilizada entre todos os processos de fabrico aditivo por extrusão baseados na deposição de material por camadas, não será de admirar que o sistema FDM apresente inúmeras soluções para diversas aplicações, desde brinquedos para crianças até à indústria aeroespacial. Um dos principais fatores que contribuem para esta polivalência é, como acima citado, os diversos materiais que estas impressoras 3D comportam, nomeadamente uma ampla gama de termoplásticos, que viabilizam uma seleção de propriedades mecânicas bastante diversificada e exigente, consoante a aplicação pretendida. Na tabela 2 estão dispostos vários polímeros tipicamente aceites pelo processo FDM.

Tabela 2.2 – Tabela resumo da gama de materiais admitido pelo FDM e respetivas propriedades mecânicas [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]

	Composição	Temp. de fusão	Temp. do extrusor	Temp. de decomp.	Densidade (Kg.m ⁻³)	Dureza (Shore D)	Módulo de Young (GPa)	Tensão de Cedência/Rotura máx. (MPa)
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno	230°C	265°C	350°C	1.02 – 1.20	67 - 80	2.1 – 2.4	50 / 55
HIPS	Poliestireno de alto impacto	220°C	230°C	340°C	1.04	95	1.9	25 / 60
PA 6	Poliamida (Nylon 6)	220°C	260°C	350°C	1.03 – 1.29	76 - 83	0.35 – 3.5	40 / 80
PC	Polycarbonato	260°C	275°C	390°C	1.19 – 1.26	79 - 80	1.79 – 3.24	70 / 74
PET	Polietileno Tereftalato	260°C	270°C	380°C	1.16 – 1.40	73 - 75	1.16 – 4.15	70 / 80
PVA	Acetato de polivinilo	200°C	215°C	290°C	1.19	58 - 80	2.0 – 3.0	46 / 65
TPE	Elastómero termoplástico	225°C	260°C	420°C	0.85 – 1.82	11 – 55	0.01 - 2.10	12 / 69
PLA	Ácido polilático	180°C	220°C	300°C	1.00 – 2.47	59 - 77	0.23 – 3.5	66 / 114

É ainda de realçar outras características singulares das impressoras 3D FDM que envolvem a complexidade dos produtos resultantes do respetivo processo de fabrico, destacando-se:

- Complexidade geométrica: capacidade de criar virtualmente qualquer forma;
- Complexidade hierárquica: possibilidade de criar geometrias complexas em múltiplas escalas;
- Complexidade funcional: capacidade de criar dispositivos funcionais, ou seja, possibilidade de obter numa única “impressão” um sistema, possivelmente articulado, de peças e não apenas um bloco;
- Complexidade de materiais: na deposição de um ponto ou uma camada, existe em certas impressoras a opção de combinar materiais, como é o caso da máquina em estudo;

Note-se a infinidade e variedade de produtos que é possível obter tendo em conta estas características e a contribuição que estas podem ter na relação qualidade/preço. Acrescente-se o facto de ser possível poupar muito material por não existirem desperdícios significativos, a possibilidade de redução de material em zonas que não conferem grande rigidez estrutural, ou mesmo a elaboração de padrões complexos que reduzem a quantidade de material da peça, mas conferem elevada rigidez.

2.2.2 Aplicações da tecnologia FDM

Após esta análise fundamentada das características notáveis do processo aditivo FDM, é agora possível descrever de forma sustentada a sua vasta aplicabilidade. Embora incida maioritariamente sobre a prototipagem rápida, o fabrico de produtos finais encontra-se em rápido crescimento, estimando-se que pode vir mesmo a ultrapassar o anterior [5].

2.2.2.1 Ferramentas e moldes

O conceito de *Rapid Tooling* centra-se na capacidade de produzir ferramentas de longa duração com boas propriedades térmicas e mecânicas, através de um processo pouco demorado

e com custos reduzidos. A tecnologia de fabrico de moldes, nomeadamente os MI (Moldes de Injeção) produzidos em termoplásticos comuns, não pretende substituir a indústria de moldes de aço ou de alumínio. Pretendem, sim, preencher a lacuna entre os moldes de alumínio e os protótipos impressos, já que os custos de produção destes são bastante elevados face ao fabrico de moldes por impressão tridimensional. Para além do processo FDM genérico, é necessário que o plástico seja posteriormente curado (solidificado) através da utilização de luz ultravioleta. Por fim, a aplicação destes moldes possibilita a produção de peças protótipos de elevada precisão no mesmo material que é especificado para o produto final, dando às empresas a capacidade de criar produtos finais realísticos, para serem utilizados em análise de desempenho funcional do produto pretendido [16].

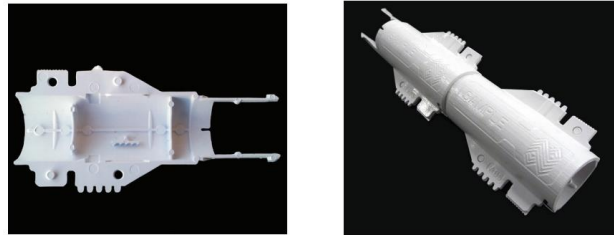


Figura 2.9 – Peça em ABS criada para experiência de injeção em molde e conjunto final (ilustração à direita) [16]

Progressos na tecnologia FDM estão a permitir a criação rápida e económica de diversas ferramentas ou componentes acessórios de outros processos de fabrico, tais como:

- Moldes para processos de injeção, *die casting* ou moldagem a vácuo;
- Moldes para fundição em areia verde;
- Moldes para fundição por cera perdida;
- Ferramentas para conformação plástica;
- Produção em série de ferramentas funcionais diversificadas de plástico ou metal.

2.2.2.2 Produção de peças de volume reduzido

Como já referido numa primeira abordagem deste capítulo, é possível obter diversos produtos finais a partir da tecnologia FDM, sejam estes constituídos pelos mais variados polímeros, estando alguns exemplificados na Figura 2.10, ou mesmo, em algumas aplicações, por metal ou cerâmicos. No entanto existem duas categorias de fabrico que permitem a criação destes produtos: direta ou indiretamente.

O fabrico indireto envolve a criação de um molde, como referido imediatamente acima, que posteriormente é utilizado para criar os tais produtos finais por um outro processo de fabrico, permitindo assim aumentar a cadência face à produção direta pela impressora. Já o fabrico direto, por sua vez, permite a obtenção de produtos prontos a comercializar apenas por uma única operação. Esta é uma área em constante crescimento, com uma massa crescente de fabricantes a explorar as potencialidades únicas do processo FDM na criação de produtos finais.



Figura 2.10 – Exemplos de produtos finais fabricados pelo processo FDM [17]

2.2.2.3 Reparação de componentes

Tem-se recorrido, essencialmente no processo específico de deposição de metal fundido, à capacidade de reparação de componentes com defeitos ou danos operacionais. Esta capacidade é particularmente atrativa em produtos de elevado custo, tais como pás de turbina ou grandes peças de elevada envergadura para equipamentos de construção. Embora exista a possibilidade de se efetuarem reparações a certos componentes por FDM, a viabilidade da reparação de pás de turbina de superligas monocristalinas tem vindo a ser comprovada por vários investigadores num outro processo aditivo já referido no presente trabalho, o DED, neste caso específico DMD, já que é relativo a metais ou ligas metálicas [6].

2.2.2.4 Engenharia Biomédica

Tendo a Medicina uma importância inegável na sociedade, a investigação e inovação nesta área é também vasta na esfera da Engenharia Mecânica, sendo que os processos de fabrico aditivo não são exceção. As aplicações do FDM englobam o fabrico completo ou parcial de dispositivos médicos, implantes e próteses customizadas, auxílio nos sistemas de libertação controlada de medicamentos ou mesmo em planeamento cirúrgico. Note-se que através de dados obtidos por sistemas de obtenção de imagens corporais, como ressonância magnética (RM) ou tomografia computadorizada (TAC), é possível criar modelos anatómicos digitais, que, por conseguinte, podem ser transformados em ficheiros CAD para posteriormente serem produzidos implantes ou próteses a partir destes.

Existe ainda uma área de investigação muito promissora que envolve a deposição de material biocompatível por meio de impressoras 3D, dedicando-se por exemplo à produção de diversas articulações ou rolamentos de carga sob a forma de implantes. A engenharia de tecidos tornou-se na atualidade uma importante área nas tecnologias de fabrico aditivo, já que permite a reposição de tecidos ou órgãos funcionais por modelagem precisa de estruturas extracelulares semelhantes às naturais. Embora o processo FDM seja capaz de produzir tais componentes, considerando os materiais biocompatíveis utilizados como o titânio, hidroxiapatita ou CoCrMo, existem outros processos de fabrico aditivo mais indicados para esta aplicação [18].

2.2.2.5 Indústria automóvel e aeroespacial

A indústria aeroespacial é caracterizada pela produção de pequenas séries de produção de alta complexidade de fabrico e materiais de custo elevado, convergindo com o presente processo de fabrico aditivo nestes requisitos. Para além disto, o processo FDM engloba uma versatilidade e agilidade de fabrico que é um fator-chave na otimização de componentes aeroespaciais. Por esta razão foi a primeira aplicação a implementar as potencialidades do FDM na execução de produtos finais [19]. A NASA assumiu o fabrico aditivo como um processo impulsionador de futuras missões espaciais, incluindo o uso do FDM para fabrico em larga escala (incluindo habitações em Marte ou na Lua), ou na reconstrução de peças ou reparação de componentes danificados no Espaço [20].

A FDM está igualmente na indústria automóvel, apresentado um enorme potencial de expansão. Gigantes do ramo automóvel, como a General Motors, Ford, Honda ou Volkswagen, já usufruem da referida tecnologia com o intuito de desenvolver novas peças funcionais, tanto com recurso a abordagens de fabrico direto como indireto (2.2.2.2).

Embora os processos de fabrico aditivo na indústria automóvel tenham primariamente a aplicação a séries de pequeno volume, estas tecnologias apresentam um enorme potencial para séries de produção de grande escala de produtos de reduzidas dimensões, tais como conexões elétricas de automação (segundo a tecnologia *Direct Write* descrita em 2.1) [6].

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

3 Definição do Problema

O presente projeto destina-se à conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura de um polímero que esteja a ser extrudido pela impressora tridimensional Kühling&Kühling RepRap Industrial, de forma a ser possível obter um controlo contínuo da temperatura no ponto imediatamente à saída do bico da ponteira de injeção. As potencialidades deste recurso têm que ver com a melhoria do sistema de controlo e monitorização do processo de fabrico aditivo realizado pela impressora 3D em causa, de que se pretende ser o maximizar o rigor, de forma a ser possível fabricar produtos em plásticos de elevado desempenho.

É da maior importância que esta medição seja não invasiva, já que um contacto com o polímero a ser injetado pode influenciar a sua deposição e assim comprometer a integridade do produto a fabricar. Este tipo de medições de temperatura é correntemente efetuado por meio de transdutores de radiação infravermelha, nomeadamente por pirómetros ou câmaras termográficas com capacidade de produção de vídeo. Todavia, as medições por este tipo de instrumentos podem levantar vários problemas, relacionados, por exemplo, com a resolução espacial dos transdutores ou interferências na radiação incidente nos sensores.

Posto isto, com o presente trabalho propõe-se elaborar diversas soluções de medição de temperatura sem contacto que contornem efetivamente as adversidades encontradas e, direta ou indiretamente, implementar a monitorização e o controlo da temperatura medida, em malha fechada, pelo sistema de controlo da impressora 3D Kühling&Kühling disponível no INEGI.

3.1 Projeto RepRap

O projeto RepRap marca um ponto de inflexão na difusão da tecnologia FDM. Iniciado em 2005, este projeto foi fundado com o intuito primário de criar uma máquina auto-replicativa. Esta capacidade implica o fabrico total ou parcial de uma máquina similar à originária, por um processo de adição de material automatizado ao máximo. Mesmo que com a tecnologia atual seja impraticável o fabrico total de uma impressora 3D de forma automática, diversos componentes desta são constituídos por polímeros, pelo que é possível serem criados por FDM. Fica destinado aos operários a montagem de “kits” de componentes impressos em conjunto com a adição de outros constituintes de uma impressora 3D RepRap.

O objetivo deste projeto prende-se com a ideia de criar máquinas de fabrico aditivo de polímeros de baixo custo e assim disponibilizar esta tecnologia não apenas para aplicações industriais, mas também para uso comum. Atualmente pode-se considerar o RepRap como o ponto de inflexão que permitiu a difusão da tecnologia FDM. O facto de disponibilizarem em *open-source* toda a estrutura base das impressoras, *software* de impressão e *drivers*, fez com que a venda de impressoras 3D proliferasse, considerando-se atualmente as RepRap as mais utilizadas, resultando conseqüentemente no surgimento de diversos colaboradores que contribuíram para o acentuado desenvolvimento desta tecnologia [21].

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

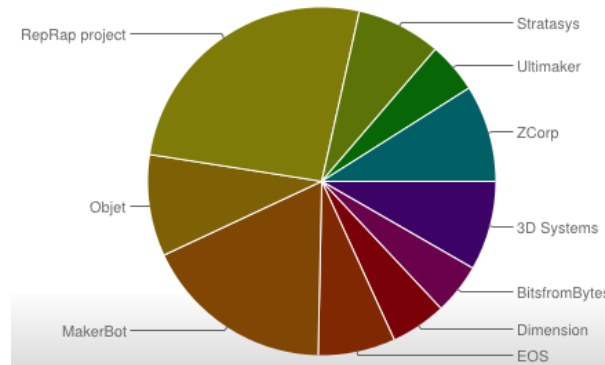


Figura 3.1 – Distribuição do mercado pelos fabricantes de impressoras 3D FDM [21]

3.2 Impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial

A impressora tridimensional FDM Kühling&Kühling Industrial (Figura 3.2), embora não permita a sua auto-replicação, encontra-se no seguimento do projeto RepRap, adotando atualmente o perfil de configurações Slic3r, disponível em código aberto [22]. Tal como este, encontram-se diversas configurações disponíveis online na comunidade *GitHub*, juntamente com outros ficheiros que fornecem dados adicionais sobre a impressora em questão. Parte destes dados tornam-se bastante úteis no desenvolvimento deste projeto, tanto na implementação física do sistema de medição como na aquisição ou manipulação de dados relativos à monitorização da temperatura das ponteiros da impressora 3D, que é o principal fator que define a temperatura do polímero à saída do bico, variável esta que se pretende ultimamente controlar.



Figura 3.2 - Impressora tridimensional FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial

As soluções criadas podem eventualmente ser inseridas no projeto RepRap, já que o intuito desta comunidade é a participação de colaboradores com o objetivo de inovar e melhorar o desempenho destas impressoras tridimensionais. Paralelamente à evolução deste trabalho, já se encontram disponíveis outras vertentes de desenvolvimento tecnológico de impressoras 3D que permitem a produção de peças por extrusão em alguns dos plásticos de alto desempenho que se pretendem integrar com o projeto atual, materiais estes que se encontram referenciados e descritos de seguida, juntamente com outros de particular interesse na indústria aeroespacial.

3.2.1 Introdução de plásticos de alta-performance no processo FDM

O objetivo último que se pretende atingir com a implementação do sistema de medição de temperatura é a utilização de plásticos de alta-performance na impressora 3D em estudo, com o intuito de produzir certos componentes com aplicação na indústria aeroespacial. Tal como referido na secção 2.2.2.5, a indústria aeroespacial cada vez mais recorre às potencialidades dos processos de fabrico aditivo, nomeadamente à tecnologia FDM, para obter peças de alta complexidade e ótimas propriedades mecânicas. Contudo, estas especificações implicam uma inovação nos polímeros depositados, juntamente com um acréscimo no rigor da tecnologia inerente ao processo de deposição destes plásticos e, conseqüentemente, do custo das peças produzidas.

Tabela 3.1 – Materiais para aplicação aeroespacial e respetivas propriedades (*já se comercializam sob a forma de bobinas de filamento para aplicação em impressoras 3D) [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]

	Designação	Temp. de fusão	Temp. do extrusor	Temp. de decomp.	Densidade (g.cm ⁻³)	Dureza (Shore D)	Módulo de Young (GPa)	Tensão de Cedência/Rotura máx. (MPa)
PEEK*	Poliéter éter cetona	343°C	395°C	400°C	1.30 – 1.48	84.5	3.0 - 9.5	95 / 213
PEI*	Polieterimida (ULTEM)	350°C	380°C	420°C	1.27 – 1.51	79.5	3.2 - 9.5	105 / 164
PI	Poliimida	360°C	395°C	400°C	1.35 – 1.51	89	4.0 - 22.6	86.2 / 116
PAI	Poliamida-imida	370°C	371°C	410°C	1.42 – 1.61	86-90	4.5 - 14.5	120 / 221
PPS	Polissulfeto de p-fenileno	280°C	340°C	370°C	1.40 – 1.51	86	3.7 - 14	105 / 185
PPSU	Polifenilsulfona	365°C	380°C	400°C	1.29	84	2.34	70 / 121
PPP	Poli-(para-fenileno)	346°C	350°C	400°C	1.21	23	8.3	207 / 207
PA 66	Poliamida (Nylon 66)	260°C	295°C	300°C	1.14	83	3.1	80 / 116

Detalhando a análise dos materiais de alta-performance que se pretende vir a utilizar no âmbito do projeto, estruturada na Tabela 3.1, é de realçar que em contrapartida a um acréscimo requerido de propriedades como a tensão de cedência ou o módulo de Young, é necessário aumentar a temperatura do extrusor da impressora 3D FDM para valores consideravelmente superiores, já que as temperaturas de fusão são igualmente superiores, o que não se prende exclusivamente com um aumento da potência de aquecimento requerido pela ponteira da cabeça da impressora. Note-se no gráfico da Figura 3.3 uma aproximação da temperatura do extrusor à temperatura de decomposição para os plásticos de alta-performance, face aos polímeros correntes anteriormente referenciados na secção 2.2.1.

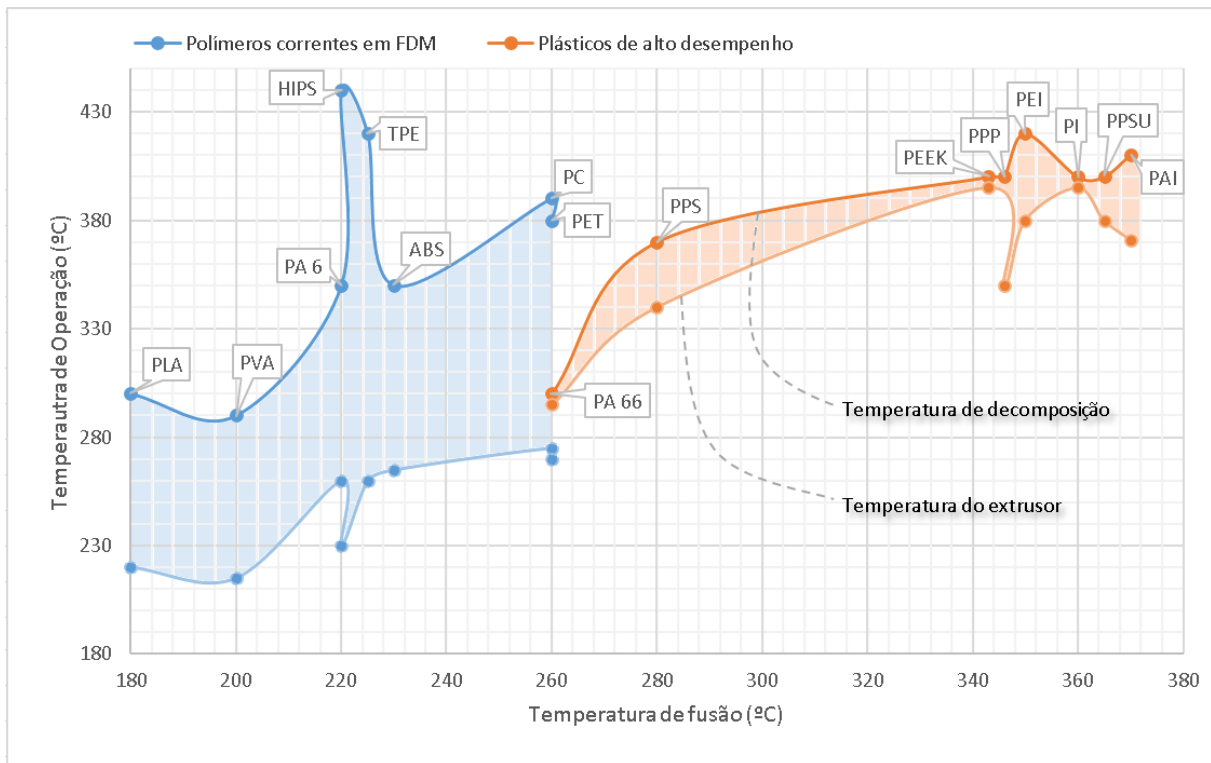


Figura 3.3 – Relação entre a temperatura de fusão de plásticos para extrusão e a respetiva gama de temperaturas de operação

Necessariamente, a temperatura de extrusão tem que ser algo superior à temperatura de fusão do plástico em todos os casos de aplicação, já que estes não apresentam uma curva de *liquidus* e *solidus* coincidente e é necessário assegurar que o plástico é injetado totalmente no estado líquido. Esta margem de segurança vai aproximar ainda mais a temperatura de extrusão da temperatura de decomposição do plástico, ou, por outras palavras, diminuir a gama de temperaturas a que é aceitável operar. No entanto, é ainda de salvaguardar que a temperatura de extrusão apenas corresponderá à temperatura do extrusor no seu limite superior, estimando-se que, tanto por questões termodinâmicas, como de transferência de calor, a temperatura correspondente no plástico esteja entre 5 a 10°C abaixo da do próprio bico, aumentando assim um pouco a gama de operação em relação à área representada no gráfico. Surge então a necessidade de representar um novo gráfico todo ele referente às temperaturas do polímero, e não do extrusor, de forma a obter a real janela de temperaturas de operação. Por falta de informação disponibilizada, não é possível reunir dados relativos à temperatura de extrusão dos polímeros, já que os fabricantes apenas referem a temperatura a implementar no bico da impressora para possibilitar a realização da extrusão do material. Com a implementação do sistema de medição proposto no presente trabalho, possibilitar-se-á a determinação da temperatura ideal de extrusão, passando a conhecer-se a efetiva gama de operação dos plásticos a utilizar na impressora 3D. Esta vai ser previsivelmente mais apertada e consequentemente será necessário realizar o seu controlo.

Claramente se compreende que é inaceitável atingir a temperatura de decomposição de um certo plástico aquando da sua extrusão, já que se pode dar a sua termólise, desencadeando a quebra de ligações químicas do composto, o que resulta na decomposição deste em pelo duas novas substâncias que não são do interesse da aplicação. Caso o aquecimento vá ainda mais além que este limite de temperatura, pode mesmo desencadear-se a degradação do plástico que de todo se deve evitar, não só pelo desperdício de material, mas também pela integridade da máquina ou mesmo do operador, caso o plástico liberte gases tóxicos e o ambiente de impressão não se encontre encerrado (não sendo o caso da impressora 3D em estudo).

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

Com esta limitação da gama real de temperaturas a que a impressora tridimensional pode operar (área colorida do gráfico) acrescentando o facto das temperaturas de extrusão serem significativamente mais altas, torna-se necessário juntar ao sistema de controlo uma monitorização direta da temperatura do polímero de forma a diminuir os erros de operação associados, para além das medições padrão efetuadas por termopares que determinam a temperatura das ponteiras, do tabuleiro, e do ambiente interior da impressora, que também contribuem como sinais de entrada no processador.

3.2.2 Monitorização da temperatura de deposição do plástico

No desenvolvimento das diferentes soluções é fulcral ter em atenção a compatibilidade dos equipamentos a instalar com a impressora 3D FDM Kühling&Kühling, tanto a nível das conexões de entradas e saídas como de *software*, visto ser imprescindível a troca de dados entre ambos. A máquina vem equipada com um computador de placa única *BeagleBone Black* (BBB), como o representado na Figura 3.4, compatível com uma pluralidade de *softwares* como *Debian*, *Android*, *Ubuntu*, *Cloud9 IDE* e muitos outros. O minicomputador apresenta uma ampla conectividade para comunicar com outros dispositivos, nomeadamente por portas série, USB, *Ethernet*, HDMI, ou mesmo leitor de cartões SD/MMC.

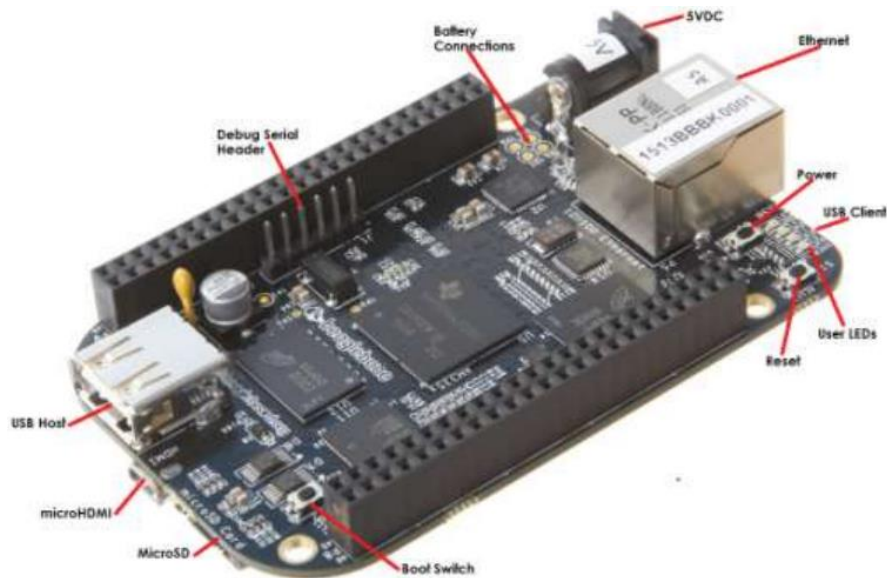


Figura 3.4 - Computador *single-board* BBB e a sua respetiva interface [31]

No entanto, parte destas entradas/saídas encontram-se ocupadas por conexões necessárias para o corrente funcionamento da impressora, como a porta USB Host que se encontra ocupada com o microcontrolador *RUMBA RepRap*, responsável por todo o processo de impressão. Para além deste, encontra-se também indisponível a porta *Ethernet* para comunicação com a rede local, por onde são recebidos os códigos referentes ao perfil de configurações a implementar, e a saída HDMI, para interface gráfica com o utilizador.

Assim sendo, surge a possibilidade de comunicação do computador da impressora 3D com o sistema de medição de temperatura a instalar pelas portas que se encontram atualmente desocupadas. É ainda necessário decidir qual o modo de comunicação entre ambos, juntamente com o tipo de controlo a implementar no sistema. Relativamente ao tipo de controlo que se pretende efetuar, este pode ser realizado por duas metodologias:

- **Método de controlo direto:** a partir de manipulação direta do sistema de controlo original da impressora 3D, substituir a variável relativa à temperatura do bico, dada pelo respetivo termopar instalado, pela variável da temperatura do polímero à saída do bico, ditada pelo novo sistema de medição térmica a implementar. Deste modo, realizar-se-ia uma monitorização direta da temperatura do polímero, que é o valor que é

verdadeiramente necessário manter dentro de certos limites, por associação desta variável com o controlo da potência que é necessário ser fornecida pelo bico;

- **Método de controlo indireto:** com esta metodologia, o sistema de controlo original da impressora 3D em nada seria alterado, apenas se iria alterar a forma como a variável relativa à temperatura do bico seria introduzida. O processo padrão de definição da temperatura teórica do bico em função do material que se pretende injetar dá-se por introdução deste valor na HMI por parte do operador, valores estes que se encontram definidos no manual da impressora 3D FDM. Posto isto, uma possível solução seria alterar a forma como este valor é introduzido no sistema de controlo da impressora, passando eventualmente a ser determinado pelo sinal de saída de um outro microprocessador ligado ao sistema de medição de temperatura a implementar, sinal este que consequentemente deixaria de ser um valor constante, já que o *feedback* de temperatura do polímero seria dado em tempo real. Note-se que este método de controlo implicaria um tratamento de dados adicional no novo microprocessador, relacionando a informação de *input* relativa à temperatura do polímero com os valores de *output* relativos às temperaturas do bico que permitissem uma compensação térmica de forma a estabilizar o sistema.

3.2.3 Limitações geométricas

Visto que o pressuposto do presente trabalho é conceber um sistema de medição de temperatura na impressora tridimensional FDM RepRap, é necessário ter em atenção que a eventual instalação de um transdutor de temperatura está confinada a um certo espaço disponível, segundo uma dada configuração. Note-se que o transdutor terá que apresentar a capacidade de acompanhar o ponto de deposição do material à saída do bico, sendo expectável que este ponto seja móvel visto se tratar de uma deposição de material por camadas. Posto isto, deduzem-se duas alternativas para realizar uma análise da temperatura eficaz e contínua do processo de deposição do polímero:

- **Sistema de medição fixo:** o transdutor é instalado num ponto fixo fora da área de impressão, com auxílio por exemplo de um tripé, focando o ponto que se pretende que seja o alvo. Em adição, o sistema carece de uma tecnologia de *tracking* do bico da impressora, que poderá ser realizado por servomotores que respondem à informação disponibilizada sobre a localização da ponteira, permitindo que o transdutor acompanhe o alvo. Esta informação encontra-se disponível no sistema de controlo da impressora 3D, já que é este que dita primariamente as coordenadas e trajetórias que a ponteira deve percorrer, devendo ser transmitida ao sistema de *tracking* com uma possível correção de posição suplementar dada por uma câmara de vídeo a instalar. Caso o campo de medição do transdutor seja amplo o suficiente para efetuar medições simultaneamente em todo volume de impressão, o sistema de *tracking* pode mesmo dar-se exclusivamente por *software*, sendo o seu principal requisito discernir o ponto de interesse a medir, ponto este que é móvel na “imagem” obtida pelo transdutor.
- **Sistema de medição móvel:** o transdutor terá que ser acoplado à própria cabeça móvel da impressora 3D (Figura 3.5), de forma a apresentar um movimento solidário com a ponteira que se encontra a depositar o material se pretende medir. Se corretamente direcionado para o ponto onde se pretende medir a temperatura, o transdutor irá manter o seu posicionamento face ao alvo e por conseguinte será possível obter uma monitorização contínua do processo de deposição de todas as camadas de material. No entanto, é necessário ter em consideração as dimensões do sistema de medição, já que o espaço para o instalar na cabeça da impressora é algo limitado e não se pretende influenciar a movimentação desta. É igualmente

importante ter em atenção o peso do transdutor, porque a cabeça ou o respetivo veio de suporte podem não estar preparados para tal sollicitação.

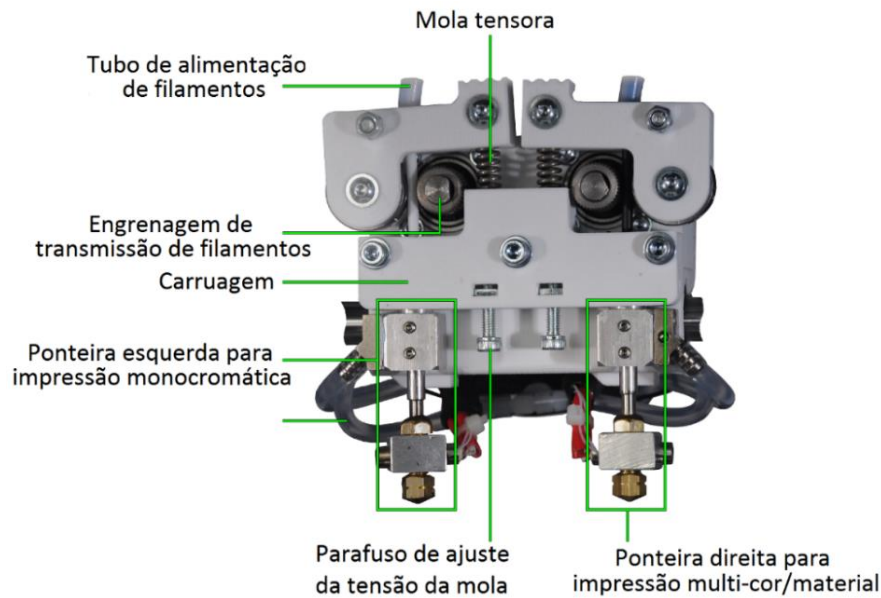


Figura 3.5 – Cabeça de extrusão móvel da impressora 3D FDM Kühling&Kühling [8]

3.2.4 Limitações de desempenho

Pretende-se medir a temperatura do filamento de polímero à saída do bico da impressora 3D FDM Kühling&Kühling, filamento este que pode ter uma espessura variável, consoante o bico instalado. Existem quatro modelos disponíveis de bicos de extrusão, tal como é visível na Figura 3.6, alternando a espessura do filamento depositado de acordo com o diâmetro do respetivo orifício. No entanto, a espessura da camada depositada (altura) não é necessariamente determinada pelo diâmetro do orifício do bico, podendo-se alterar a configuração do perfil para atingir espessuras até um mínimo de 0.1mm e um máximo de cerca de 80% do diâmetro do orifício.

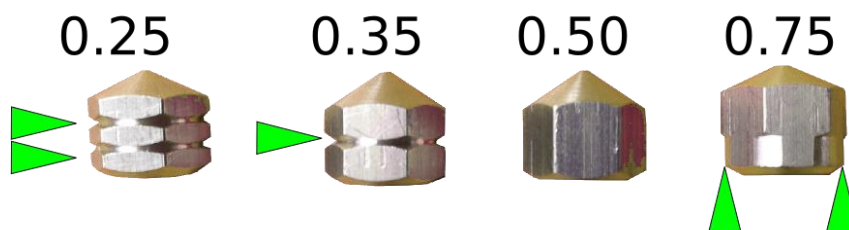


Figura 3.6 – Modelos disponíveis de bicos extrusores e o respetivo diâmetro do furo (mm) [8]

Devido ao ponto de medição de temperatura apresentar dimensões tão reduzidas, a resolução espacial dos transdutores torna-se um requisito fundamental que restringirá fortemente as soluções possíveis, já que o sistema de medição térmica tem que estar apto a discernir valores de temperatura de pontos com dimensões até 0,1mm. Para acrescentar a esta dificuldade, como foi referido na secção anterior, este ponto para além de bastante reduzido encontrar-se-á em movimento aquando da deposição dos polímeros.

Visto se tratar de uma análise térmica do polímero, fenómenos de ruído podem surgir nas medições a realizar pelo transdutor, já que o ponto alvo se encontra adjacente a um objeto que previsivelmente apresentará temperaturas mais elevadas, a ponteira da cabeça da impressora, que é a fonte de calor que funde o plástico por condução. Sendo um sistema de medição de temperatura sem contacto, pressupõe-se que o sensor deste irá ser relativamente sensível a todos os corpos que imitam calor dentro da câmara da impressora, como a referida ponteira ou mesmo

o tabuleiro de deposição da peça, que embora apresente temperaturas mais reduzidas que a ponteira e o próprio polímero, apresenta temperaturas na ordem dos 130°C. É então necessário ter em atenção a calibração do sistema de medição, que deve ser preferencialmente realizada já no local e posição em que irá atuar, de forma a compensar as emissões de calor descritas e a própria temperatura do ambiente da câmara, usualmente de 70°C.

Podem ainda ser tomados em consideração outros aspetos característicos dos transdutores a implementar, como a sua capacidade de resistir a altas temperaturas com ou sem refrigeração externa ou a velocidade de resposta, que deve ser suficiente para o posterior controlo de compensação dos valores de temperatura a implementar na ponteira. Estes e outros aspetos encontram-se tratados com mais pormenor no capítulo seguinte, a respeito das diversas soluções de medição de temperatura sem contacto disponíveis no mercado.

4 Medição de Temperatura Sem Contacto

A temperatura é a grandeza física mais frequentemente medida a seguir ao tempo, pelo que se pode deduzir a importância do seu controlo, nomeadamente no ramo da Engenharia Mecânica. Em certas aplicações é desaconselhável efetuar esta medição com contacto físico, sendo possível recorrer a instrumentos de medição de temperatura não-invasivas que não afetam o sistema em causa. Usualmente estes dispositivos baseiam-se na radiometria, sendo sensíveis a parte do espectro de radiação eletromagnética, com vista a receber e processar informação de qualquer corpo que emita radiação nessa gama de comprimentos de onda, tipicamente infravermelhos. Outros métodos sugerem o uso da espectroscopia, recorrendo, portanto, a análises espectrais no âmbito da medição de temperaturas elevadas em meios semitransparentes, como chamas ou gases.

É bastante comum os diferentes processos de fabrico aditivo beneficiarem de sistemas de medição de temperatura para a sua monitorização, já que se tratam usualmente de temperaturas de operação elevadas que são necessárias controlar, mas nem todos estão capacitados para medir diretamente a temperatura dos materiais no preciso momento da extrusão, sem interferirem com a sua deposição. As vantagens das medições de temperatura sem contacto parecem ser bastante claras, já que permitem:

- Medições sem interação com o objeto de estudo, não influenciando o comportamento deste;
- Medições não destrutivas;
- Medições sem desgaste mecânico, o que vai permitir ciclos de vida maiores;
- Medições de corpos em movimento;
- Medições de corpos sobreaquecidos ou em ambientes corrosivos;
- Medições sem interferências;
- Medições de corpos ou superfícies de difícil alcance por contacto;
- Tempos de exposição e resposta muito rápidos [32].

4.1 Radiometria

Uma transferência de calor pode ocorrer por três fenómenos fundamentais: condução, convecção e radiação. A última forma descreve-se concretamente por uma transferência de energia térmica por meio de radiação eletromagnética, que é igualmente radiação térmica. É de conhecimento comum na Física que qualquer corpo que apresente temperaturas superiores ao zero absoluto (-273.15°C) emite radiação eletromagnética. O zero absoluto é a temperatura em que os eletrões, átomos ou moléculas de um material se encontram nos níveis energéticos mínimos, não ocorrendo transições de estado que possam resultar numa emissão de radiação. Em temperaturas superiores a 0K a quantidade de radiação emitida, função do comprimento de

onda, depende da temperatura do corpo e das características da superfície, tais como a emissividade [33].

A emissão de radiação eletromagnética pode ser explorada com o fim de efetuar medições de temperatura. Radiometria é um ramo da física ótica ondulatória que lida com a medição de temperaturas numa gama de frequências entre 3×10^3 e 3×10^6 GHz, que corresponde a comprimentos de onda compreendidos entre 10nm e 10 μ m, incluindo as regiões do espectro ultravioleta, visível e infravermelha, sendo a última a mais recorrente [34].

Os sistemas de medição por infravermelhos compreendem uma fonte, um meio transmissivo de radiação, um sistema ótico que a coleta, um transdutor que a converte num sinal elétrico proporcional à temperatura, amplificação do sinal e circuitos de interface para controlo, registo e apresentação das medições [35].

4.1.1 Espectro de radiação eletromagnética

O espectro de radiação representa a junção de ondas eletromagnéticas distinguidas pelo seu comprimento de onda ou frequência. Toda a radiação segue os mesmos princípios físicos de difração, refração, reflexão e absorção, correspondendo a sua velocidade de propagação à velocidade da luz, a menos que esta atravesse um meio dispersivo. Como referido anteriormente, em condições normais, o comprimento de onda λ e a frequência f de uma certa onda eletromagnética estão naturalmente relacionados, resultando o produto de ambos numa constante, que é a velocidade da luz c :

$$\lambda \cdot f = c$$

A radiação infravermelha cobre uma área reduzida de comprimentos de onda do espectro, entre 0.78 μ m a aproximadamente 1000 μ m, ilustrada na Figura 4.1. Dentro destes valores a gama em que é possível efetuar medições de temperatura por infravermelhos é restrita, já que a radiação com comprimentos de onda acima 14 μ m apresenta níveis energéticos tão reduzidos que os instrumentos não são sensíveis o suficiente para detetá-la [32].

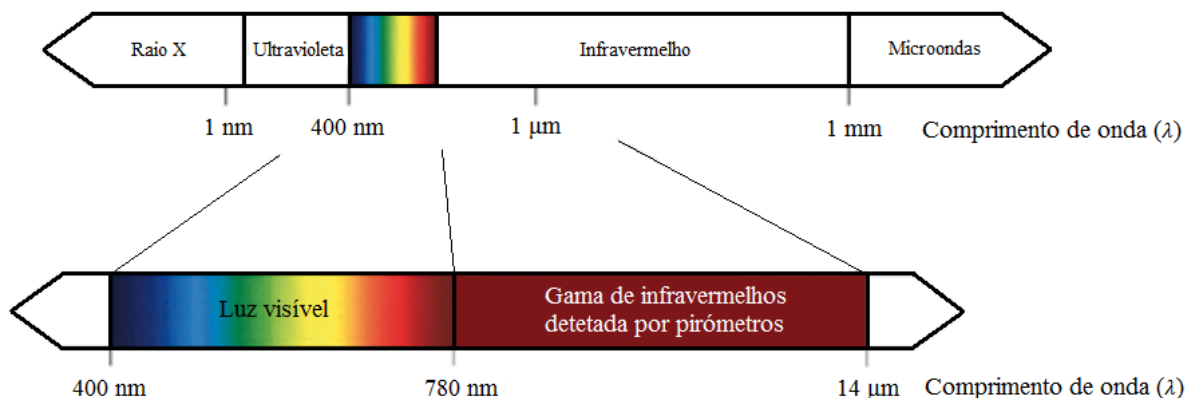


Figura 4.1 - Espectro eletromagnético e respetiva gama detetável por pirómetros

4.1.2 Fundamentos físicos de radiação

A radiação térmica emitida por uma superfície não é distribuída de forma equitativa em todos os comprimentos de onda, existindo uma relação entre a intensidade de radiação e o espectro eletromagnético. Todos os corpos emitem radiação em todos os comprimentos de onda, podendo ou não ser desprezável em certas análises. A quantidade de radiação de um comprimento de onda específico é dita monocromática. O termo “poder emissivo” é usado para designar a radiação térmica por unidade de área que é emitida por uma superfície, podendo ser um valor espectral (num comprimento de onda específico) ou total.

Quando se estudam superfícies reais é útil recorrer ao conceito de superfície ideal, denominada de “corpo negro”, para comparação de ambas. Para assumir um corpo como sendo um corpo negro, é necessário que cumpra os seguintes requisitos:

- Absorver toda a radiação incidente seja qual for o comprimento de onda ou direção;
- Para um dado comprimento de onda e temperatura, nenhuma superfície é capaz de emitir mais radiação que um corpo negro;
- A intensidade de radiação emitida é independente da direção.

A lei de Planck, marco histórico da Física, descreve o poder emissivo espectral em função da temperatura e do comprimento de onda da radiação emitida por um corpo negro, de acordo com a seguinte expressão [35]:

$$E_{\lambda,b} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1]}$$

Onde:

$E_{\lambda,b}$, é o poder emissivo espectral de um corpo negro ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\mu\text{m}$)

C_1 , é a 1ª constante de radiação = $3.7418 \times 10^{-16} \text{W}\cdot\text{m}^2$

C_2 , é a 2ª constante de radiação = $0.0144 \text{m}\cdot\text{K}$

λ , é o comprimento de onda (m)

T, é a temperatura absoluta (K)

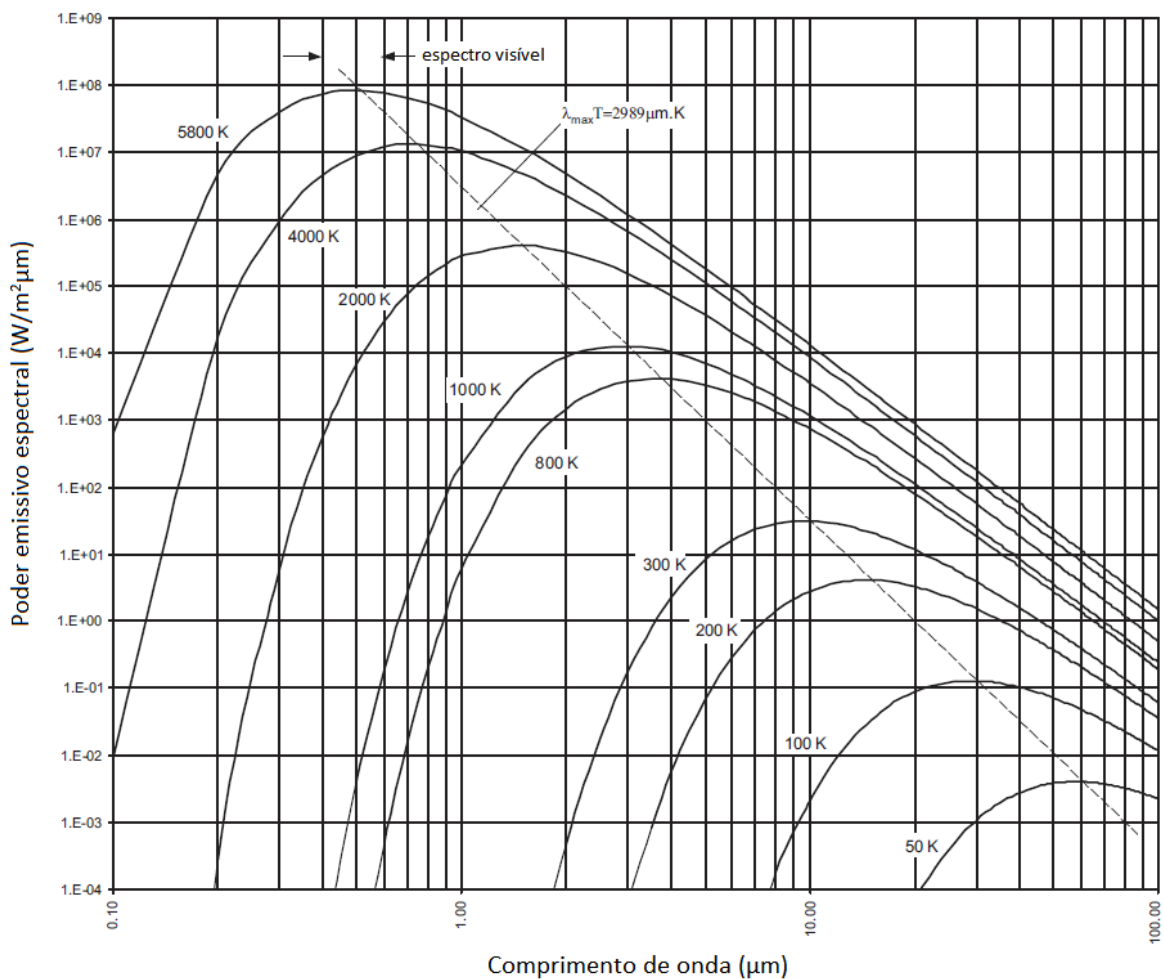


Figura 4.2 – Distribuição espectral do poder emissivo de um corpo negro

Observando a distribuição espectral do poder emissivo de um corpo negro (Figura 4.2), resultante da exploração da equação de Planck, é possível tirar algumas ilações. Entre elas destacam-se:

- Desde que um corpo apresente temperaturas superiores a 0K, radiação é emitida pela sua superfície;
- Quanto maior for a temperatura do corpo, maior será o seu poder emissivo;
- A frequência à qual o poder emissivo é máximo, varia linearmente com a temperatura;
- Numa gama alargada de temperaturas, incluindo as que são pretendidas controlar neste estudo, o poder emissivo na zona dos infravermelhos aproxima-se do máximo.

Integrando a intensidade de radiação para todos os comprimentos de onda é possível obter o poder emissivo total hemisférico de um corpo negro, resultando na lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

É observável na Figura 4.3 que nenhum corpo se comporta do mesmo modo que um corpo negro, sendo que à mesma temperatura emitem consideravelmente menos radiação. Um corpo cinzento é aquele que apresenta um poder emissivo mais reduzido que um corpo negro, no entanto absorve toda a radiação incidente sobre ele. Num caso dito real, ocorrem irregularidades que distinguem o comportamento de um certo corpo relativamente a um corpo cinzento, por características apresentadas de seguida.

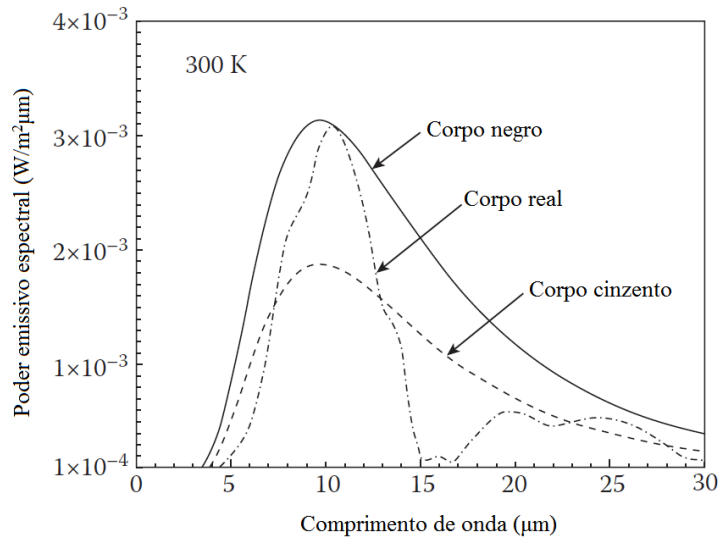


Figura 4.3 – Comparação entre o poder emissivo de um corpo negro, cinzento e real

A relação entre a radiação emitida por um corpo real e um corpo negro é definida pela emissividade (ϵ), compreendida entre 0 e 1, valor que vai depender não só da natureza da superfície, mas também da direção da incidência da radiação, comprimento de onda e temperatura desta. No entanto considera-se que em materiais não-condutores, como é o caso da maior parte dos polímeros da impressora tridimensional em estudo, a emissividade é aproximadamente constante para ângulos de incidência inferiores a 70°.

Uma vez que a emissividade de uma superfície vai influenciar o poder emissivo do respetivo corpo, é possível adaptar a lei de Stefan-Boltzmann a uma situação dita “real”:

$$e = \epsilon \cdot e_b = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

A radiação emitida por um corpo, quando se encontra em equilíbrio térmico, equivale à radiação por ele absorvida (α). No entanto, pode ainda existir radiação oriunda das suas vizinhanças a ser refletida, que no caso dos polímeros será 5 a 10% da radiação que incide sobre a sua superfície (refletividade - ρ), ou transmitida através do seu interior, sendo a transmissividade (τ) inversamente proporcional à espessura do corpo [32]. Na aplicação em estudo a transmissividade será substancial, visto se tratar de um processo de fabrico aditivo com deposição de material de secção fina, sendo esperada apenas a obtenção de uma medição média de temperaturas do perfil, e não da superfície [36]. Na Figura 4.4 são visíveis as diferentes origens da radiação captada por um sensor, sendo que a soma dos três rácios que relacionam o comportamento de um corpo real com um corpo negro, terá que ser unitária:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

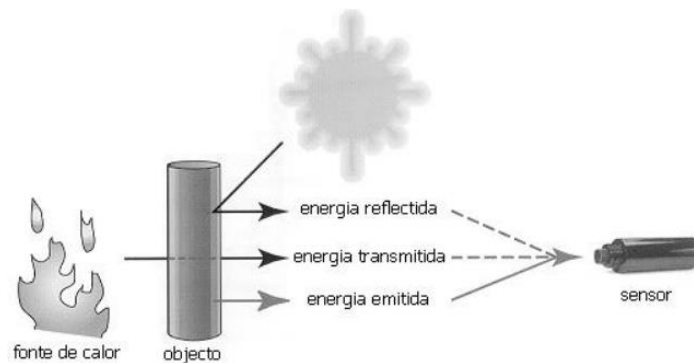


Figura 4.4 - Radiação emitida, refletida e transmitida por um corpo dito real

É de extrema importância escolher um sistema de medição de temperaturas que abranja uma gama de comprimentos de onda o mais restrita possível, de forma a evitar erros de avaliação das características enumeradas. De forma a tornar esta variável menos influente, deve-se efetuar medições em gamas com elevado declive da curva característica de temperatura/radiação. Note-se na Figura 4.5 a influência da escolha de transdutores, sensíveis a diferentes gamas de espectro, nos erros de medição de temperatura relacionados com a emissividade, definida a 10%. Verifica-se também que para menores comprimentos de onda ou menores temperaturas o desvio na medição de temperatura será igualmente menor. Um dos fatores que pode contribuir para este fenómeno é o aumento da emissividade dos corpos não-metálicos aquando da diminuição da temperatura [37].

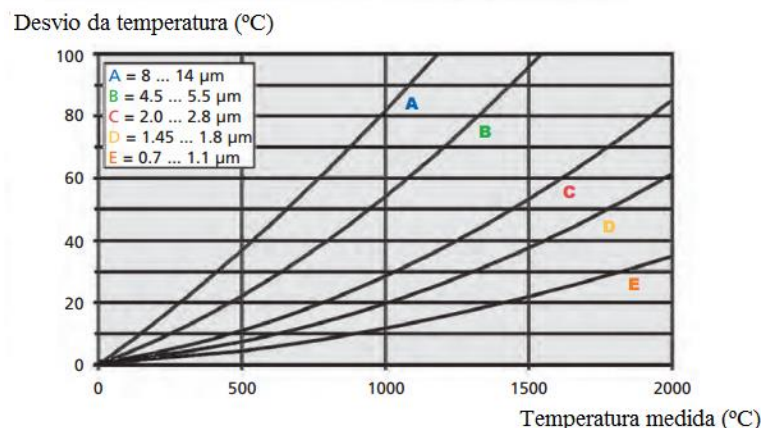


Figura 4.5 - Erros de medição com emissividade definida a 10% [38]

Contudo, os não-metais são de mais fácil medição devido às suas propriedades emissivas. Os instrumentos de medição de temperatura escolhidos para estes materiais devem ser sensíveis a uma gama do espectro de radiação em que a emissividade do corpo seja alta e o mais constante possível. Geralmente nos polímeros esta mantém-se aproximadamente constante para comprimentos de onda compreendidos entre 3 e 5µm ou 8 e 14µm [39].

4.2 Transdutores

O componente que requer maior atenção nesta família de dispositivos de medição de temperatura é o transdutor, que é o elemento que desencadeia a transformação de radiação infravermelha (IV) num sinal de saída elétrico. Este componente encontra-se presente em todos os sistemas de medição de temperatura por infravermelhos, sendo o elemento determinante da resolução espectral e nível de potência térmica que é possível atingir, tal como a complexidade necessária para estes requisitos serem cumpridos. Existem dois grupos de transdutores que serão descritos com algum rigor de seguida: os transdutores térmicos e os transdutores quânticos.

Na seleção do tipo de transdutor apropriado ao uso numa certa aplicação, é importante ter em atenção diversos aspetos, entre eles:

- Gama de comprimentos de onda à qual respondem;
- Frequência/velocidade de resposta;
- Sensibilidade térmica e resolução;
- Necessidade de sistemas de refrigeração e respetivo custo e complexidade;
- Custos e fiabilidade [33].

4.2.1 Transdutores térmicos

Os transdutores térmicos dependem da incidência de radiação infravermelha sobre o elemento sensor, resultando num aumento da temperatura que desencadeia um outro fenómeno físico que determina a quantidade de radiação do corpo emissor. A Figura 4.6 ilustra uma representação típica de um transdutor térmico.

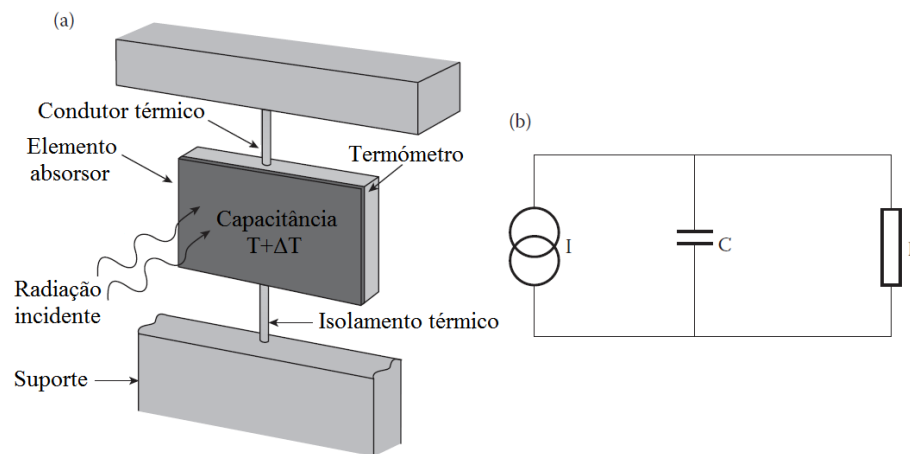


Figura 4.6 – (a) Transdutor térmico; (b) circuito elétrico análogo [34]

Normalmente os transdutores térmicos não necessitam de refrigeração externa, mas certos tipos de transdutores requerem um controlo de temperatura de forma a operarem nas condições ótimas.

O desempenho de um transdutor térmico é determinado essencialmente por duas fases. Uma primeira que depende das características térmicas do sistema e que determina o aumento de temperatura do transdutor em função radiação incidente. Numa segunda fase, essa elevação de temperatura resulta numa mudança nas propriedades do sistema que dependem dela, que vão desencadear o sinal de saída. A primeira fase é comum a todos os transdutores térmicos, já a segunda difere consoante o tipo de transdutor. Posto isto, descrevem-se de seguida os vários princípios de funcionamento de transdutores térmicos disponíveis no mercado [34].

4.2.1.1 Conjunto de termopares de radiação

É do conhecimento comum na Física que com a junção de dois fios condutores de materiais distintos (Figura 4.7) é possível obter uma diferença de potencial V_{out} proporcional a uma variação da temperatura. O uso conjunto de vários termopares ligados em série vai apenas aumentar essa diferença de potencial, o que permite obter sinais de saída de nível mais elevado.

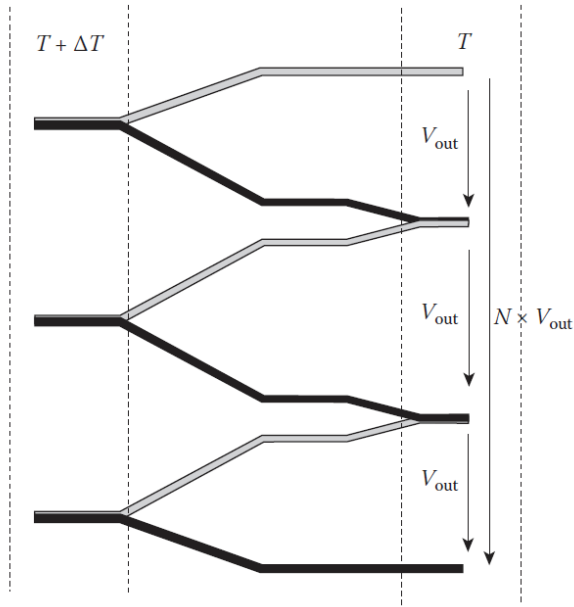


Figura 4.7 – Esquemática de um conjunto de termopares [34]

Os termopares podem ser utilizados como transdutores de infravermelhos caso se coloque uma das suas extremidades em contacto com uma camada isoladora, de forma ao sinal de saída ser potenciado já que o ΔT será previsivelmente maior.

Embora o tempo de resposta dos termopares clássicos seja reduzido, a introdução da tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) melhora significativamente o desempenho, por introdução do circuito *on-chip*. Não é corrente este tipo de transdutores apresentar maior sensibilidade que os descritos no ponto seguinte, mas em muitas aplicações são mais indicados pela sua fiabilidade, precisão e boa relação preço/desempenho [34].

4.2.1.2 Transdutores piroelétricos

Sempre que ocorre uma variação de temperatura numa estrutura cristalina piroelétrica produz-se na sua superfície um campo elétrico com uma direção específica, como resultado da alteração espontânea da polarização em função da temperatura. Em condições de equilíbrio, uma assimetria elétrica é compensada pela presença de elétrons livres. Se, entretanto, a temperatura do material se alterar a uma taxa suficientemente rápida a compensação de carga é redistribuída, resultando num sinal elétrico mensurável. Com isto pode considerar-se um transdutor piroelétrico como um aparelho AC, ao contrário de outros transdutores térmicos que medem níveis de temperatura em vez de diferenças de temperatura.

Um transdutor piroelétrico pode ainda ser considerado como um pequeno condensador com dois elétrodos condutores, disposto perpendicularmente à direção de polarização espontânea do material piroelétrico, e dessa forma pode ser traduzido num circuito elétrico como o visível na Figura 4.8. Antes da utilização deste tipo de transdutores deve-se aplicar um campo elétrico e aquecer o material piroelétrico. Aquando da operação de medição da temperatura, a variação da polarização é detetada por variação do campo elétrico do

condensador, o que resulta na geração de uma corrente elétrica de magnitude proporcional ao aumento de temperatura e ao coeficiente piroelétrico do elemento sensor [34].

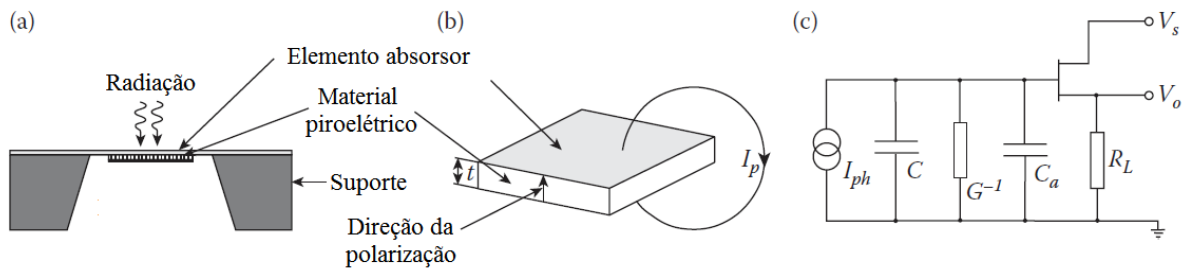


Figura 4.8- Transdutor piroelétrico: (a) Esquema da seção de corte; (b) Componente piroelétrico; (c) Circuito elétrico análogo [34]

4.2.1.3 Bolómetros

A Figura 4.9 ilustra um bolómetro, um elemento resistivo constituído por materiais que por um lado apresentam reduzida capacidade térmica, mas por outro um elevado coeficiente térmico, de maneira a que a absorção de radiação resulte numa grande variação da sua resistência. Em contraste com os termopares, a medição da temperatura nestes instrumentos é conseguida por ação de uma polarização de corrente contínua controlada através do transdutor e monitorizando de seguida a tensão de saída. A variação de resistência ocorre como num fotodíodo, no entanto os mecanismos básicos de deteção são diferentes. No caso dos bolómetros o poder radiativo produz um aquecimento da placa absorvedora, o que desencadeia uma variação de resistência, não existindo nenhuma interação direta entre fótons e eletrões [34].

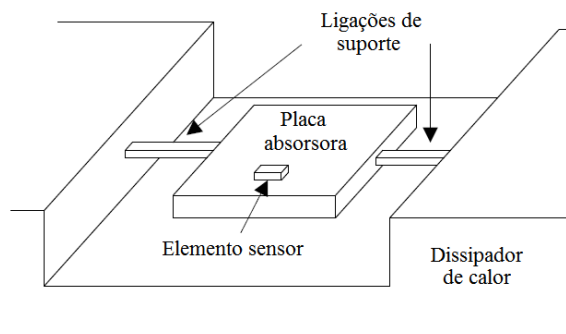


Figura 4.9 – Representação esquemática de um bolómetro, onde a radiação incide sobre a placa absorvedora [40]

Atualmente os FPA (*Focal Plane Array*) são uma tecnologia de reprodução de imagem de infravermelhos que tem por base a aplicação de bolómetros, que são dispostos por camadas finas neste dispositivo, criando uma solução com uma boa relação preço/desempenho, levando para segundo plano os scanners ótico-mecânicos [40].

4.2.2 Transdutores de fótons

A radiação incidente sobre este tipo de transdutores transporta fótons, que interagem a nível atômico e molecular com certos componentes semicondutores, desencadeando uma produção de carga elétrica ou variação de resistência dentro do elemento sensor. O mecanismo envolve a absorção de fótons (que pode ser potenciada pelo uso de coletores), interagindo de seguida com eletrões do elemento semiconductor que vão mover-se de um nível energético para outro. Dentro dos semicondutores, que se caracterizam pela capacidade absorptiva e profundidade de absorção, o campo elétrico decai exponencialmente com a energia transferida aos transdutores de carga. O sinal elétrico resultante (ou a variação de resistência) é proporcional à temperatura do corpo emissor de radiação, pelo que depois de linearizar esta relação é possível obter a temperatura deste. A Figura 2.10 representa uma estrutura típica de um transdutor de

fotões, com a peculiaridade de integrar um coletor para absorver mais eficazmente a radiação emitida pelo corpo a medir.

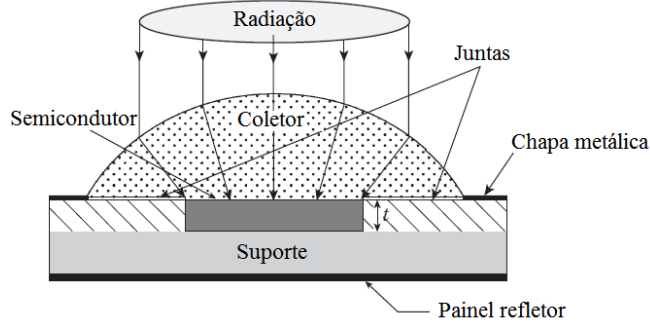


Figura 4.10 - Representação típica de um transdutor de fotões [34]

Geralmente, os transdutores de fotões apresentam maior sensibilidade que os térmicos. Contudo, para alcançar estas melhorias de desempenho é necessário recorrer a sistemas de refrigeração, de forma aos transmissores de carga ocuparem os níveis energéticos necessários para se desencadear a interação necessário com os fotões incidentes [33].

4.3 Calibração e determinação da temperatura de um corpo

O sinal elétrico desencadeado pelo transdutor relaciona-se com a lei de Stefan-Boltzmann já citada anteriormente:

$$U \sim \varepsilon T_{obj}^4$$

Contudo é necessário ter em atenção a radiação refletida do ambiente ($\rho = 1 - \varepsilon$, caso se esteja perante um corpo opaco) e a própria radiação do instrumento de medição, que contribuirão para o total de radiação incidente no sensor:

$$U = C \cdot [\varepsilon T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) \cdot T_{amb}^4 - T_{pir}^4]$$

Onde,

U , é o sinal do transdutor

$T_{obj/amb/pir}$, é a temperatura do objeto/ambiente/termómetro

C , é a constante específica do termómetro

De acordo com o anteriormente descrito, os sistemas de medição de temperatura IV não cobrem a totalidade de comprimentos de onda do espectro eletromagnético, podendo ser necessário alterar o expoente das variáveis de 4ª ordem da expressão anteriormente, de acordo com a gama de leitura de comprimentos de onda. Na medição de temperatura por radiação IV entre 7 e 14µm, este expoente n pode variar entre 17 e 2 (entre 2 e 3 para comprimentos de onda longos e entre 15 e 17 para curtos), estando este valor dependente de λ . Assim, podemos reescrever a expressão:

$$U = C \cdot [\varepsilon T_{obj}^n + (1 - \varepsilon) \cdot T_{amb}^n - T_{pir}^n]$$

Reordenando a expressão é possível calcular a temperatura de um certo objeto medida por um termómetro de radiação IV, destacando-se as variáveis que são necessárias conhecer para a sua obtenção:

$$T_{obj} = \sqrt[n]{\frac{U - C \cdot T_{amb}^n + C \cdot \varepsilon T_{amb}^n + C \cdot T_{pir}^n}{C \cdot \varepsilon}}$$

No caso de aplicação na impressora tridimensional em estudo, a temperatura ambiente será no máximo de 70°C para o ar, mas ocorre também aquecimento intencional do tabuleiro de compósito de carbono onde é depositado o polímero até aos 130°C, valor que é preciso ter em consideração visto ser uma temperatura relativamente alta, afetando igualmente a medição feita pelo sensor.

O cálculo de todas as temperaturas resulta numa curva que é armazenada numa memória não-volátil do tipo *EEPROM* no termómetro de radiação IV, de forma a assegurar a rapidez dos processos de medição de temperatura [32].

Para além de uma análise cuidadosa da emissividade do polímero a medir, variável de enorme importância no cálculo da temperatura de um corpo como é visível na expressão anterior, é também preciso ter em atenção se o material apresenta uma transmissividade substancial. Esta característica varia não só com o comprimento de onda, mas também com a espessura do corpo, que neste caso corresponderá ao diâmetro do filme de deposição do polímero (0,25 a 0,75mm) [8]. Em aplicações genéricas verifica-se que para todos os plásticos a transmissividade ronda os 5 a 10%, mas é possível os fabricantes de termómetros IV estudarem e testarem o comportamento de materiais específicos de forma a indicar quais as gamas de comprimento de onda ótimas a medir pelo transdutor.

Contudo existem janelas de comprimentos de onda específicas de cada material em que é possível verificar-se um comportamento opaco, ou seja, transmissividade praticamente nula. Dando o exemplo de dois polímeros usados no processo de deposição da impressora tridimensional em estudo, o poliestireno (PET) e a poliamida (PA), verifica-se que estes se comportam como corpos opacos em emissões de radiação a 3.43 e 7.9 μm , respetivamente.

Note-se que caso o objetivo fosse medir corpos com espessuras consideráveis, a transmissividade seria bastante reduzida, pelo que seria aceitável efetuar medições entre os 8 e os 14 μm .

4.3.1 Influência do ambiente

A transmissividade do ar depende fortemente do comprimento de onda das radiações que o atravessam. Como é visível na Figura 4.11 existem oscilações acentuadas entre áreas do espectro semi-opacas, dadas pela absorção de certos compostos presentes no ar, e áreas de alta transmissividade, denominadas janelas atmosféricas. Verifica-se que existe uma gama de alta transmissividade estável (8-14 μm) em que é possível obter medições fiáveis, sendo que em comprimentos de onda de infravermelhos mais pequenos é necessário ter em atenção as irregularidades de transmissividade do ar. No entanto existem outras janelas de medição típicas nesta zona do espectro que se encontram entre 1.1-1.7 μm , 2-2.5 μm e 3-5 μm .

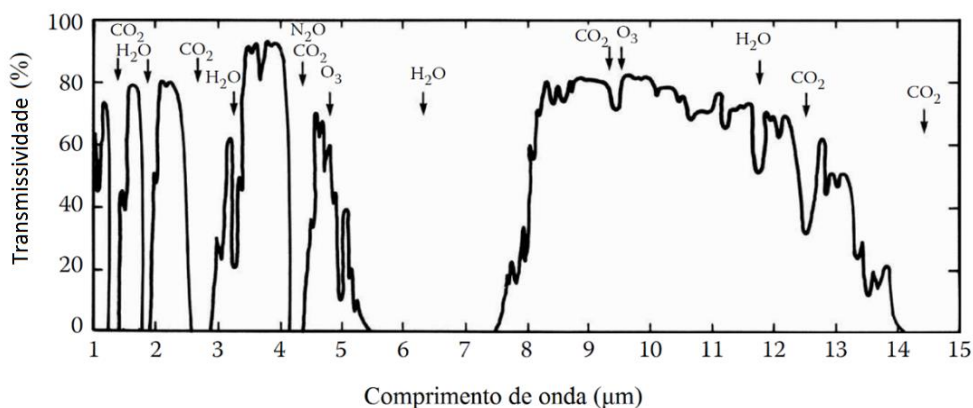


Figura 4.11- Transmissividade espectral do ar [39]

Para além da influência da transmissividade do ar, é necessário ainda ter em atenção outros corpos quentes presentes no ambiente que igualmente influenciam as medições. Como foi referido, o tabuleiro onde é depositado o polímero durante o processo aditivo encontra-se a elevadas temperaturas e desta forma o sistema de medição de temperatura tem que estar preparado para compensar a influência da radiação inevitavelmente emitida por este. Existem ainda outros elementos presentes na impressora tridimensional que vão prejudicar as medições, como a temperatura do bico de deposição, que usualmente atinge os 300°C mas pode no âmbito deste estudo atingir os 400°C, ou mesmo a temperatura das paredes de acrílico que encerram o ambiente do processo de fabrico, que poderão atingir temperaturas próximas às do ar dentro da câmara (até 130°C) [10]. Espera-se que a influência da radiação oriunda do bico seja a mais influente no processo, já que para além de apresentar temperaturas mais elevadas que o próprio polímero injetado se encontra bastante próximo da área sujeita à medição. Com o fim de compensar a influência destes fenómenos interferentes, um segundo sensor de temperatura é acoplado ao sistema de medição, ajustando corretamente a emissividade e assim possibilitando a obtenção de uma medida da temperatura do polímero com menor incerteza.

Embora o manual da impressora tridimensional indique uma não formação excessiva de matéria suspensa, existe o risco da sua acumulação nas óticas, o que pode levar a erros de medição. Posto isto, o sistema de medição a implementar deve vir equipado com purgas de ar comprimido direcionadas para as óticas, prevenindo assim a indesejável deposição de poeiras.

Para além destes acessórios, o termómetro deve vir munido de um sistema de refrigeração para prevenir o seu sobreaquecimento, já que a temperatura ambiente poderá atingir os 130°C. A maioria destes sistemas de medição, nomeadamente pirómetros, necessitam de sistemas de refrigeração quando operam em ambientes com temperaturas superiores a 80°C, mas existem alguns dispositivos especialmente preparados para ambientes mais desfavoráveis em que é possível operar a temperaturas até 250°C sem necessitar de refrigeração.

4.3.2 Determinação experimental da emissividade

Existem tabelas de valores típicos de emissividade para vários materiais a uma certa temperatura, no entanto, para além de ser difícil encontrar valores específicos de emissividade à temperatura de extrusão dos polímeros usados na impressora tridimensional em estudo, é pretendido uma análise rigorosa da temperatura, pelo que é preferível obter estes valores experimentalmente. Três modos correntes para a medição experimental da emissividade da superfície de corpos que vão posteriormente ser alvo de medições de temperatura são descritos de seguida. Note-se que estes métodos são algo limitados quanto aos fatores já referidos que influenciam este tipo de medições, pelo que o mais aconselhado é realizar estes procedimentos já com o sistema de medição instalado no ambiente funcional, de modo a que os ajustes de emissividade já tenham em conta todos os elementos radiativos participantes.

4.3.2.1 Recurso a termopares

Embora os termopares apresentem a desvantagem de ter um baixo tempo de resposta face a variações da temperatura, trazem uma importante mais valia relativa à exatidão em medições pontuais caso se verifique baixa dissipação de calor, mesmo sendo instrumentos de custo reduzido.

O processo consiste no uso deste sistema de medição em simultâneo com um termómetro de IV. Dando o termopar um valor real da temperatura do corpo, é realizada uma estimativa da emissividade, sendo esta manipulada usando um processo iterativo até que o valor da temperatura medida pelo termómetro IV coincida com o obtido pelo termopar.

4.3.2.2 Criação de um corpo negro de teste

Um corpo-teste do mesmo material que o objeto a medir é perfurado com uma profundidade de pelo menos seis vezes o diâmetro do furo, sendo que este tem que ser obrigatoriamente maior que a área de medição do termómetro. Este furo apresentará uma emissividade bastante próxima de 1, pelo que se pode considerar uma fonte de radiação análoga a um corpo negro. Inicialmente a temperatura do furo é medida, apontando-se de seguida a ótica para a superfície do objeto. Depois de conhecido o valor da temperatura no furo a emissividade do material é obtida por comparação. Note-se que no caso dos corpos em estudo apenas é possível utilizar este método após solidificação do polímero, tal como no processo descrito no ponto seguinte.

4.3.2.3 Referência de uma emissividade conhecida

Neste processo é colocada sobre o objeto uma banda com uma emissividade conhecida que serve como referência na medição. Ajustando o sistema de medição para o valor conhecido é possível obter a temperatura da banda, que se assume aproximadamente igual à da superfície do objeto. Posto isto, quando se aponta a ótica diretamente para a superfície obtém-se uma intensidade de radiação emitida inferior, mas a mesma temperatura, pelo que segundo a lei de Stefan Boltzmann temos apenas uma variável por conhecer, que é a emissividade.

4.3.3 Calibração geométrica do sistema de medição

No caso específico dos pirómetros, especialmente os que são sensíveis à radiação infravermelha, as óticas são definidas por um rácio entre a distância ao corpo alvo e a área circular do corpo em que a radiação é recetível pelo sensor ($D:S$ - *distance-to-spot-ratio*), encontrando-se estas variáveis apresentadas na Figura 4.12. Dependendo da qualidade do sensor, pode ou não existir radiação das periferias que afete as medições [32]. A ocorrência deste fenómeno está associada a efeitos indesejáveis, mas inevitáveis, como a difração ou sucessivas reflexões dentro da lente do pirómetro, ou entre esta e o sensor.

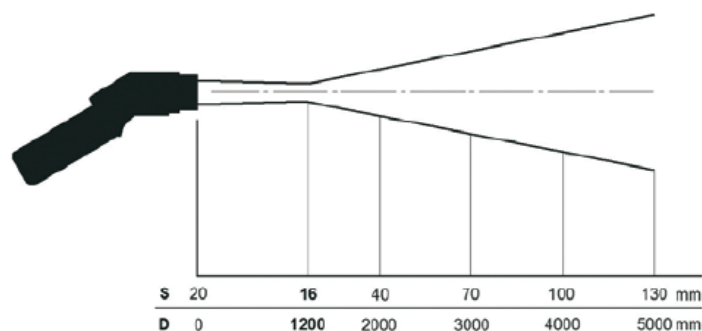


Figura 4.12 – Exemplo de um diagrama ótico de um pirómetro

O máximo valor de $D:S$ será o correspondente à radiação emitida por uma fonte hemisférica, sendo que a variação do sinal inerente ao redimensionamento da fonte é denominado por *Size-of-Source Effect* (SSE) [38].

No seguimento destas e outras noções, todos os fabricantes utilizam geometrias precisamente definidas para calibrar os seus pirómetros. Se for efetuada uma calibração a partir de uma fonte com um diâmetro alvo coincidente com D , qualquer medição que exceda esta área apresentará leituras com valores demasiados altos. Por outro lado, caso se calibre o pirómetro com uma área demasiado grande da fonte de radiação pode resultar em leituras de valores muito reduzido para medições em corpos com área correspondente ao D do pirómetro. Posto isto, o diâmetro de calibração recomendado será compreendido entre estes dois valores extremos.

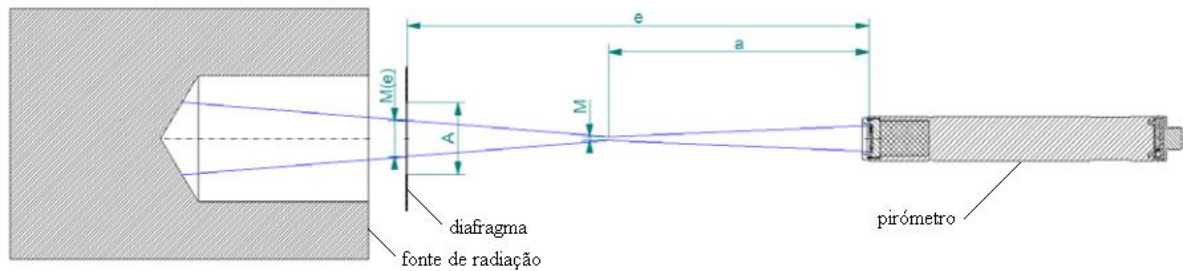


Figura 4.13 - Geometria de calibração oficial para pirómetros [41]

Através de relações geométricas observáveis na Figura 4.13 é possível obter a expressão de calibração recomendada que relaciona as dimensões nominais “a” e “M” com a área “A” necessária para o orifício da fonte de radiação, quando o processo de calibração é realizado a uma distância “e” entre o pirómetro e a fonte.

$$A = \sqrt{a \cdot M}$$

No entanto, caso estejamos perante um instrumento que apresente um comprimento “a” muito elevado, a área necessária para o orifício será igualmente muito elevada, pelo que uma fonte de radiação desta magnitude pode tornar-se de difícil obtenção. Uma segunda expressão de calibração pode ser utilizada para os casos em que tal ocorra:

$$e = A \cdot \sqrt{\frac{a}{M}}$$

Com esta expressão, ao invés de se determinar a abertura do diafragma, obtemos a distância entre este e o pirómetro, podendo esta ter um valor mais reduzido que o parâmetro “a”, como é exemplificado na Figura 4.14 [42].

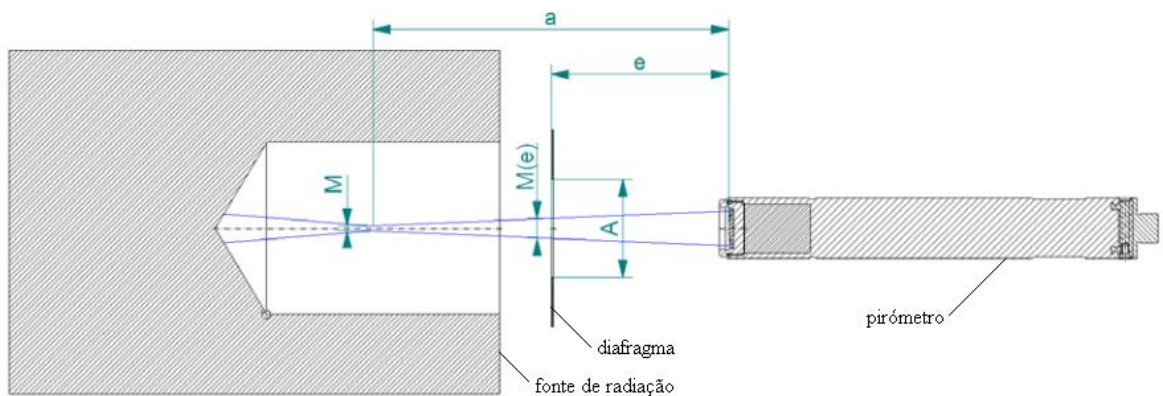


Figura 4.14 - Aplicação alternativa da geometria de calibração [41]

O objetivo da criação de um processo normalizado de calibração é criar pré-condições equitativas entre fabricantes e utilizadores.

4.3.4 Definição da lente

O sistema ótico de um pirómetro representa o início da cadeia do processo de medição da temperatura sem contacto. As lentes recebem a radiação infravermelha emitida pelo objeto a medir e convergem-na no sensor, sendo que este processo apenas se considera correto se a superfície desse objeto for maior do que o diâmetro S que a lente abrange, como esquematizado na Figura 4.15. Note-se que a resolução ótica é tanto maior, quanto maior for o rácio D:S.

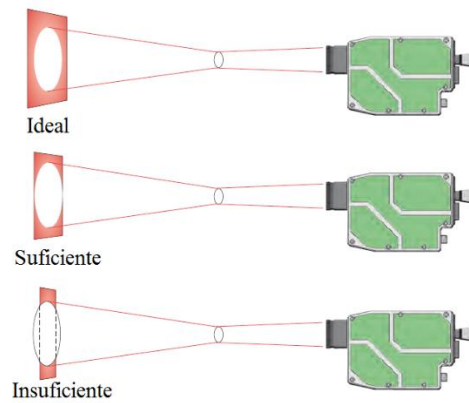


Figura 4.15 – Relação entre a superfície do objeto e o diâmetro de medição

Devido ao material com que são produzidas, as lentes utilizadas nas medições de infravermelhos são apenas válidas para gamas de comprimentos de onda muito específicos. A Figura 4.16 revela janelas de medição de materiais tipicamente usados em sistemas de medição IV de acordo com a relação entre comprimento de onda e transmissividade.

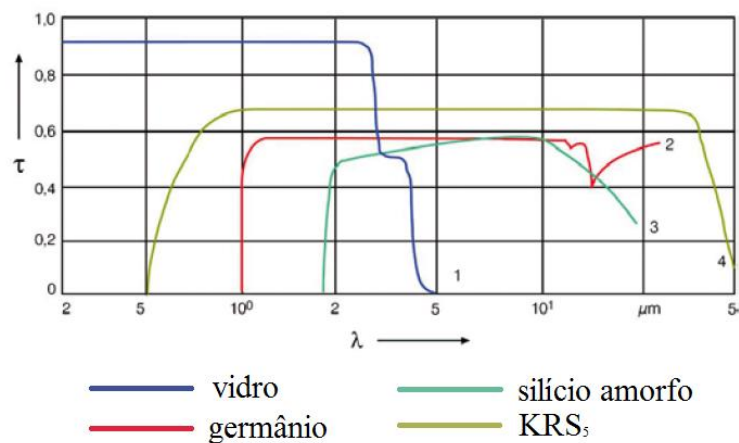


Figura 4.16 – Transmissividade de materiais tipicamente usados em sistemas de medição IV (1mm de espessura)

Como é expectável, a janela de medição da lente escolhida deve coincidir com a gama de comprimentos de onda detetável pelo sensor, mas é ainda necessário ter em atenção a influência que a temperatura apresenta na transmissividade de um material, como se encontra explicito na Tabela 4.1. Existem ainda outros parâmetros a destacar que influenciam a escolha das lentes, como o seu diâmetro e espessura ou a pressão a que estas vão estar sujeitas, parâmetros estes que estão relacionados. Note-se que o material da lente, que é também transparente no espectro visível, pode contribuir para o ajuste do sensor ao corpo a medir.

Tabela 4.1 – Materiais utilizados em lentes de sistemas de medição IV e respetivas propriedades

Material	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaF ₂	BaF ₂	AMTIR	ZnS	ZnSe	KRS ₅
Gama de λ (μm)	1-4	1-2,5	2-8	2-8	3-14	2-14	2-14	1-14
Temperatura máxima	1800	900	600	500	300	250	250	-
Resistência à humidade ou corrosão	muito alta	muito alta	baixa	baixa	alta	alta	alta	alta

A aplicação de um revestimento antirreflexo nas lentes pode melhorar significativamente a transmissividade (até 95%). A perda de transmissividade pode ser compensada com a sua configuração no caso do fabricante ter especificado a gama de comprimentos de onda a que o dispositivo trabalha, caso contrário, tem que ser identificada juntamente com uma fonte de referência.

4.4 Família de pirómetros de radiação

Todo o corpo com temperatura acima do zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{K}$) emite radiação eletromagnética pela sua superfície, parte dela infravermelha, que é proporcional à sua temperatura intrínseca. Com a ajuda de lentes os feixes convergem no elemento sensor, que por sua vez gera um sinal elétrico proporcional ao comprimento de onda da radiação. O sinal é amplificado e após uma linearização e processamento digital é transformado num sinal de saída proporcional à temperatura do corpo alvo em estudo, podendo esta ser diretamente exibida num ecrã. Existe ainda um segundo sensor que mede a temperatura do dispositivo de medição e do seu canal ótico, com o intuito de compensar a influência do ambiente. Na Figura 4.17 é possível verificar a estruturação dos elementos referidos através de um diagrama de blocos.

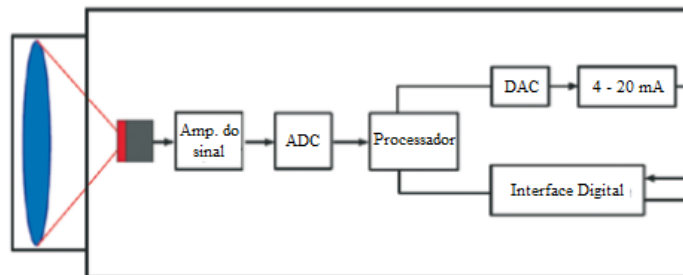


Figura 4.17 - Diagrama de blocos ilustrativo do funcionamento de um pirómetro [32]

O valor da temperatura pode ser disponibilizado sob a forma de um sinal analógico de 4 a 20 mA ou 0 a 10 V. Em alternativa a maior parte destes dispositivos de medição vêm equipados com interfaces digitais (USB, RS232, RS485) tornando acessíveis os parâmetros destes e possibilitando a continuação externa do processamento do sinal [32].

4.4.1 Pirómetros de espectro

Este tipo de pirómetros mede a radiação de um dado objeto numa gama de comprimentos de onda extremamente estreita, podendo em termos práticos considerar-se que apenas abrange um comprimento de onda específico. A gama de comprimentos de onda é restringida por meio de um filtro de interferência e pelos sensores apropriados.

Embora os pirómetros de espectro sejam frequentemente usados para medir a temperatura de vidro a partir da leitura de radiação com o comprimento de onda de $5.14\mu\text{m}$, também pode ser útil para filamentos de polímeros semitransparentes ($7.9\mu\text{m}$). Para além desta aplicação, este tipo de pirómetros adequa-se também a metais, já que estes só apresentam alta emissividade em bandas estreitas de comprimentos de onda.

4.4.2 Pirómetros de banda

A estrutura destes pirómetros é idêntica aos acima descritos, mas diferem nos filtros e sensores usados, esquematizados na Figura 4.18, para medir uma gama um pouco mais alargada de comprimentos de onda (por exemplo entre 8 e $14\mu\text{m}$), embora sejam de banda estreita. É possível encontrar no mercado pirómetros de banda estreita a efetuar medições entre os 700 e os 4000°C .

Podem ser úteis na aplicação pretendida já que a sua aplicação é vulgarmente voltada para materiais orgânicos, como os termoplásticos usados no presente trabalho.

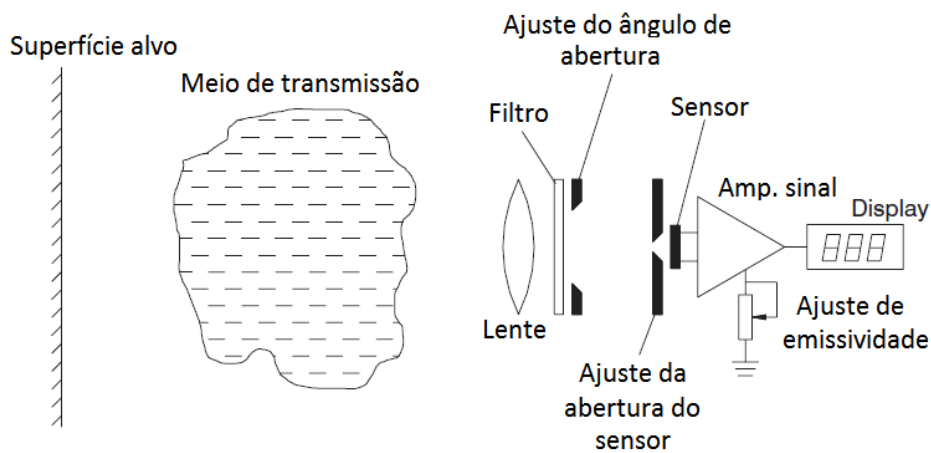


Figura 4.18 – Principais componentes de um pirómetro de banda

4.4.3 Pirómetros de radiação total

Os pirómetros de radiação total, ou de banda larga, são projetados para captar mais de 90% da radiação emitida por um objeto, o que naturalmente requer sensores especiais, lentes e filtros que sejam sensíveis à quase totalidade do espectro. A radiação pode ser convergida por meio de uma lente ou coletada por um espelho côncavo, como é visível na Figura 4.19, e o sensor por sua vez emite um sinal elétrico proporcional à temperatura.

As medições deste instrumento resultam numa temperatura média dos corpos que se encontram no seu campo de visão e devido a esta característica espera-se que não seja o mais indicado nesta aplicação, já que os restantes objetos a altas temperaturas dentro da câmara de impressão, como o bico da impressora ou o tabuleiro, iriam levar a erros de medição, associados também a problemas relacionados com as janelas de emissão ou emissividade.

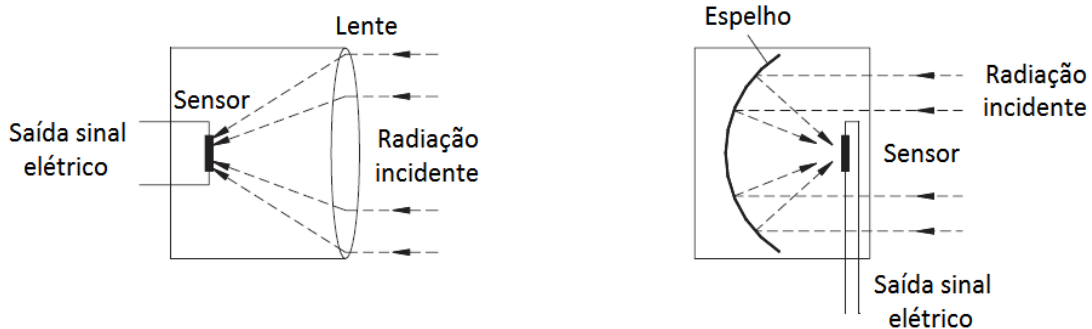


Figura 4.19 - Recurso a lentes ou espelhos de forma a focar radiação na lente [43]

4.4.4 Pirómetros de rácio

Os pirómetros de rácio, também conhecidos como pirómetros de duas cores, distinguem-se pela capacidade de efetuar medições em duas gamas de comprimentos de onda distintas, mas próximas, calculando-se posteriormente a temperatura através de um rácio entre ambos os sinais. Visto tratar-se de um cálculo de duas equações, usando a lei de Stefan-Boltzmann, para duas incógnitas (emissividade e temperatura) nesta aplicação é eliminada a questão da emissividade, não sendo necessário o seu conhecimento à priori. No entanto, é da maior importância salientar que o rácio de emissividades deve permanecer constante ao longo da

medição, embora seja possível introduzir um fator de compensação quando tal não suceda, caso contrário este tipo de medições torna-se menos exato que os de “uma só cor” para a mesma gama de comprimento de onda [44].

O rácio das quantidades de radiação emitida em dois comprimentos de onda emitidos é dado pela seguinte expressão:

$$R = \frac{\varepsilon_{\lambda_1} \cdot \lambda_2^5 \cdot (e^{\frac{c_2}{\lambda_2 T}} - 1)}{\varepsilon_{\lambda_2} \cdot \lambda_1^5 \cdot (e^{\frac{c_1}{\lambda_1 T}} - 1)}$$

Na aplicação específica a corpos que apresentem emissividades espectrais na gama dos infravermelhos próximas de 1 (corpo negro), como é o caso dos polímeros usados na impressora tridimensional, a expressão pode ser simplificada, conseguindo-se uma obtenção direta da temperatura do corpo:

$$T = \frac{C_2 \cdot (\lambda_1 - \lambda_2) / \lambda_1 \lambda_2}{\ln \left[R \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right]}$$

Os pirómetros de rácio apresentam como vantagem em aplicações específicas a não variação no sinal de saída quando a superfície a medir não cobre totalmente o diâmetro S de medição, ou quando surge ruído, como poeiras ou fumo, considerando-se que a interferência é dada de igual forma nos dois comprimentos de onda. Em contrapartida, este tipo de medições só é válido para gamas de temperaturas bastante altas (em grande parte dos instrumentos de 800°C a 2700°C) e apresentam menor sensibilidade que os pirómetros espectrais ou de banda [38].

4.4.5 Pirómetros multi-wavelength

O princípio de funcionamento é análogo aos pirómetros de rácio, com a peculiaridade de nestes ser medida a radiação emitida em três ou mais comprimentos de onda. O cálculo da temperatura real do corpo é realizado através dos diversos rácios de comprimento de onda, com auxílio de um algoritmo de correção e modelos empíricos de emissividades espectrais. Apesar da complexidade tecnológica, os pirómetros *multi-wavelength* são hoje em dia uma ótima solução para algumas aplicações mais restritas, nomeadamente na indústria metalúrgica [38].

4.4.6 Pirómetros de fibra ótica

Na monitorização da temperatura de superfícies ou de gases é possível utilizar fibra ótica para transmitir radiação numa gama restrita de comprimentos de onda desde o local onde se encontra o corpo alvo até ao sensor de infravermelhos.

O modelo mais usual, esquematizado na Figura 4.20, inclui uma cavidade de safira num extremo da fibra ótica, que se comporta aproximadamente como um corpo negro. Ao receber radiação emitida por um dado objeto através da cavidade, a fibra ótica transmite-a até a um foto-díodo, que mede a sua intensidade num comprimento de onda particular e converte-a num sinal elétrico proporcional. Este tipo de instrumentos encontra-se preparado para realizar medições desde os 100°C até 4000°C [35].

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

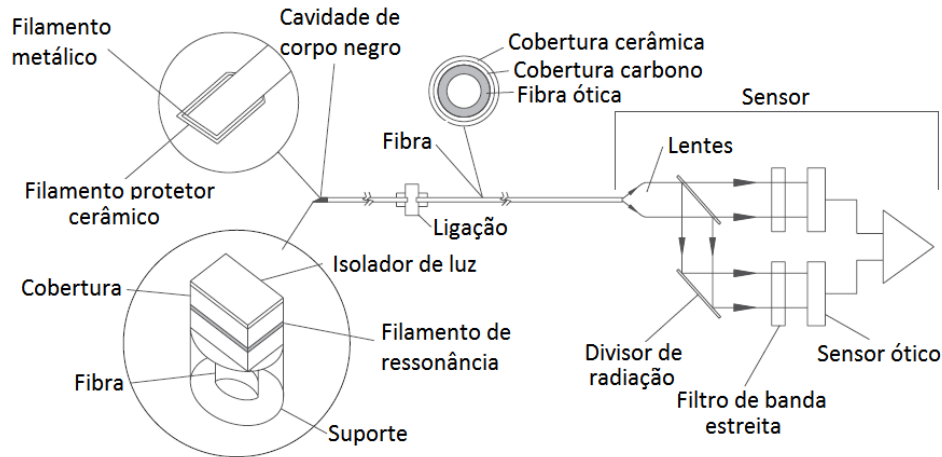


Figura 4.20 - Estrutura típica de pirómetro de fibra ótica [43]

Esta estrutura apresenta inúmeras vantagens, principalmente devido à separação física entre a unidade ótica e o transdutor:

- Capacidade de operar em ambientes com elevadas temperaturas: devido à unidade ótica e a própria fibra ótica não possuírem nenhuma componente eletrónica, é possível suportarem temperaturas até aos 250°C, instalando-se o transdutor numa zona mais amena;
- Boa adaptabilidade a espaços confinados: para além da fibra ótica apresentar boa manobrabilidade, a unidade ótica é de dimensão reduzida;
- Resistência a campos eletromagnéticos fortes: como acima descrito, a unidade ótica e a fibra ótica não apresentam componentes eletrónicas, pelo que são compostos por materiais não-magnéticos;
- Possibilidade de efetuar medições no vácuo;
- Campo de visão linear: tal como os pirómetros de rácio, é possível obter-se um campo de visão linear ideal para medir a temperatura de um vazamento contínuo de material, como é o caso do processo de fabrico em estudo [38];

A transmissão de radiação através da fibra ótica é dada pela sua reflexão total no revestimento, avançando no espaço através do núcleo, como é discernível na Figura 4.21. Com este método de propagação, pode-se assumir uma transmissão de radiação praticamente sem perdas.

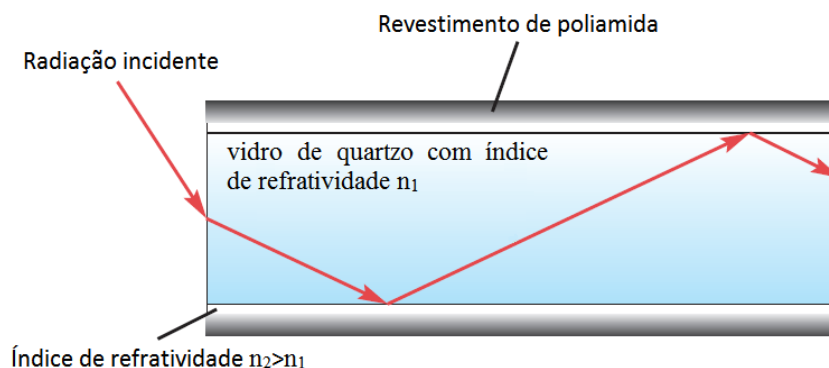




Figura 4.21 - Secção longitudinal de um cabo de fibra ótica [38]

Existem ainda dois tipos de configuração dos cabos de fibra ótica: mono-fibra ou feixe de fibras. As vantagens de cada tipo encontram-se descritas na

Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comparação entre diferentes configurações de cabos de fibra ótica

Configuração	Mono-fibra 	Feixe de fibras 
Vantagens	Menor diâmetro externo	Baixo custo
	Reconhecimento imediato de quebra do cabo (ausência de sinal de saída)	Maior flexibilidade
	Inexistência de atrito entre fibras individuais	-

4.5 Câmaras termográficas

A termografia é uma técnica de registo gráfico, por imagem ou vídeo, da distribuição de energia térmica emitida por um corpo, sendo possível através dessa informação obter dados bastante precisos sobre a distribuição de temperaturas da superfície alvo. A estrutura habitual das câmaras termográficas inclui um sistema ótico, um transdutor, processadores eletrónicos e eventualmente um ecrã. Caso este não esteja incorporado no aparelho é possível visualizar a saída de imagem por ligação a um ecrã externo. É possível utilizar apenas um transdutor e algum tipo de digitalizador para transmitir um sinal de radiação de uma região específica do sistema ótico para construir uma imagem bidimensional da distribuição de temperaturas (Figura 4.22), embora seja necessário um sistema de refrigeração devido à elevada intensidade de radiação incidente que é focada apenas num ponto. Existe um arranjo alternativo que dispensa refrigeração auxiliar, em que a radiação é distribuída por uma matriz de transdutores, definida por matriz de plano focal (FPA), que como anteriormente referido no ponto 4.2.1.3 é constituída por bolómetros.

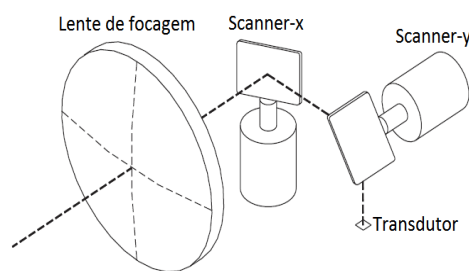


Figura 4.22 – Sistema básico de digitalização bidimensional para um único transdutor

O campo de visão (FOV – *Field of View*) horizontal das câmaras termográficas varia tipicamente entre 6° para lentes telescópicas e 48° para lentes grande angular, mas o valor mais comum é de 26°. De notar que quanto mais afastado da câmara estiver um corpo, maior será a área suscetível a medição e, por consequência, maior será a área representada por cada pixel. É de salvaguardar que a densidade de radiação emitida por um corpo é independente da distância e por conseguinte as medições não são afetadas pela distância ao objeto alvo, desde que se considerem áreas amplas de medição [42].

A gama de leitura ideal para câmaras termográficas, tal como para outros sistemas de medição de temperatura por infravermelhos, é determinada pela análise da distribuição de radiação emitida por comprimento de onda, pelas características de transmissão do meio e pela tecnologia disponível para os transdutores. O espectro de transmissividade do ar da Figura 4.11

justifica o uso corrente das gamas de medição dos transdutores entre os 3 e os 5 μm (MWIR – *Medium-wave Infrared*) e os 7 a 14 μm (LWIR – *Low-wave Infrared*), já que apresentam um ótimo índice de transmissão de radiação, apesar de na primeira existir uma descontinuidade nos 4.2 μm devido à absorção realizada pelo CO₂. É também relevante referir que, embora a irradiação nos comprimentos de onda MWIR seja inferior que nos LWIR, para pequenas variações de temperatura a radiação emitida nos comprimentos de onda MWIR varia consideravelmente mais, apresentando por conseguinte maior contraste termográfico nas imagens obtidas (Tabela 4.3) [33].

Tabela 4.3– Irradiação e contraste para diferentes comprimentos de onda em corpos à temperatura ambiente

Comprimento de onda (μm)	Irradiação (Wm^{-2})	Contraste (% irradiação para $\Delta 1^\circ\text{C}$)
3-5	4.06	37.7
8-12	93.4	16.9
8-14	133.2	15.7

A radiação emitida na gama MWIR apenas pode ser medida por meio de objetivas constituídas por germânio, ligas de germânio, compostos de zinco, silício, safira ou outras com superfícies espelhadas. Estas objetivas revestidas são constituídas por conjuntos de três lentes esféricas ou duas não-esféricas, sendo necessária a calibração de cada uma delas para cada pixel, especialmente em câmaras de infravermelhos com lentes amovíveis, de forma a serem conseguidas medições corretas e fiáveis. O facto das câmaras IV necessitarem de lentes com este nível de exigência quando comparadas com lentes óticas utilizadas para captar o espectro visível, contribui significativamente para o ainda elevado custo deste tipo de equipamento, embora o preço tenha vindo a decair com o desenvolvimento tecnológico [45].

Como já mencionado no ponto 4.1.2, diferentes materiais apresentam diferentes variações de emissividade de radiação no espectro infravermelho, pelo que é de maior importância parametrizar as medições quando se pretende obter uma análise termográfica de um corpo/material específico. Caso contrário, sem uma correção local dos valores de emissividade o transdutor IV assume um valor padrão para toda a área abrangida no FOV.

A imagem gerada por uma câmara termográfica é normalmente visualizada com recurso a um ecrã externo, pertencente por exemplo a um computador, ou um pequeno ecrã incorporado na câmara idealizado para ser visto diretamente ou por meio de uma ocular, sendo ambos normalmente LCD's. As imagens podem em último caso ser codificadas por uma escala de cores que representam a distribuição real das temperaturas, como é visível na câmara termográfica da Figura 4.23.



Figura 4.23 – Exemplo de uma câmara IV com LCD (Flir E4)

É recorrente que as câmaras IV apresentem um *software* de análise e processamento de dados das imagens geradas. Este *software* pode ser integrado na câmara ou ser projetado para uso num computador externo. Tipicamente este tipo de programas permite o destacamento de

4.6.2 Fluorescência induzida por laser

Após uma molécula ou átomo ser excitado a tendência é ele regressar ao seu estado inicial por diminuição do seu nível energético, que pode ser determinado por análise da fluorescência. Entenda-se por fluorescência a emissão de fótons de luz visível que ocorre quando os eletrões regressam ao estado energético fundamental. A fluorescência pode ser induzida por diferentes métodos, nomeadamente por indução com um laser (LIF – *Laser-induced Fluorescence*), que consiste na emissão ótica por moléculas que foram anteriormente excitadas a níveis energéticos mais elevados por absorção de radiação laser. Posteriormente é necessária a captação e processamento da fluorescência, realizada por uma técnica denominada fluorometria. Esta técnica permite efetuar medições na gama de temperaturas entre os -70°C e os 2700°C .

4.6.3 Espectroscopia de emissão/absorção

A espectroscopia de absorção ou de emissividade consiste em técnicas de análise da distribuição de temperaturas em gases ou chamas a altas temperaturas. Como enunciado no ponto anterior, os átomos emitem radiação eletromagnética caso um eletrão que se encontre num elevado nível de energia decaia para um de menor energia, sendo os intervalos de comprimento de onda emitidos nestas circunstâncias conhecidos por espectro de emissão (Figura 4.25), espectro este que varia de acordo com a composição dos materiais. A espectroscopia de emissão envolve a análise de espectros de emissão, dispondo de sistemas de deteção de luz, um *monochrometer* e um PMT (*Photomultiplier Detection System*) [46].

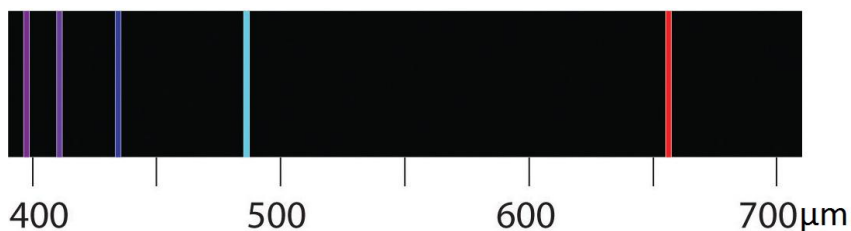


Figura 4.25 – Espectro de emissão do H₂

Quando os átomos se encontram no estado fundamental de energia apresentam a capacidade de absorver radiação eletromagnética em certos comprimentos de onda, que no seu conjunto representam o espectro de absorção (Figura 4.26). A espectroscopia de absorção baseia-se na emissão de um laser e na medição dos respetivos comprimentos de onda absorvidos, devido a uma ou mais transições moleculares. De forma a obter corretamente a temperatura é imprescindível comparar o espectro de absorção obtido com um modelo teórico, calculando-a através de um rácio entre os dois espectros com recurso à lei de *Stefan Boltzmann*.

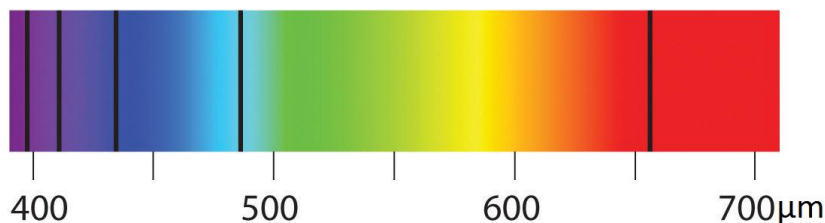


Figura 4.26 – Espectro de absorção do H₂

Aplicações deste método apresentam tipicamente 15% de erro absoluto no valor das temperaturas calculadas, pelo que não possui a exatidão pretendida no presente trabalho [47].

4.6.4 Método Line Reversal

A metodologia recorre às potencialidades dos espectrómetros, com uma estrutura semelhante à Figura 4.27, envolvendo a comparação entre uma amostra de gás de referência a uma temperatura conhecida e uma outra de teste em que a temperatura é desconhecida, por meio da análise dos respetivos espetros de riscas. Se a temperatura de um gás é menor que a temperatura do espectro contínuo, as riscas aparecerão no espectro de absorção, de forma similar à Figura 4.26, caso a temperatura seja superior aparecerão no espectro de emissão (Figura 4.27). A temperatura do gás pode então ser determinada por ajustamento do espectro contínuo até ocorrer a inversão espectral das riscas.

É possível com este método medir temperaturas na gama dos 700°C a 2500°C, com uma incerteza entre $\pm 10^\circ\text{C}$ a $\pm 15^\circ\text{C}$, não cumprindo assim os requisitos do presente estudo [48].

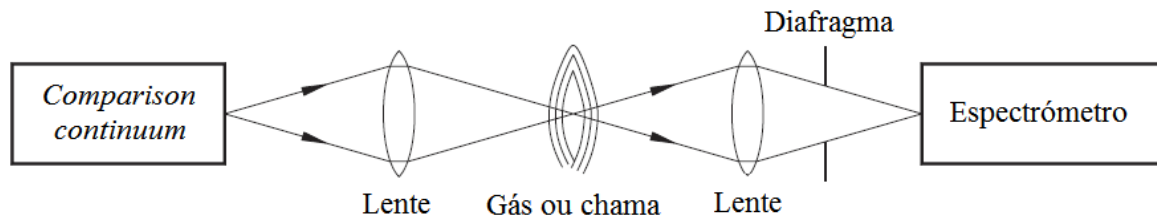


Figura 4.27 - Técnica de *line reversal* para medição de temperatura de um gás [43]

4.6.5 CARS - Coherent Anti-Stokes Raman Scattering

A tecnologia CARS permite uma monitorização de temperatura não invasiva de chamas, gases ou plasma, envolvendo a irradiação destes com dois feixes de laser paralelos com a frequências distantes (ω_1 e ω_2), o que resulta na formação de um terceiro com uma frequência ω_3 função das anteriores, como é observável na Figura 4.28. A temperatura pode ser calculada devido à sua proporcionalidade com a proporção entre eletrões excitados e eletrões no estado fundamental, sendo a densidade destes determinada por análise da intensidade de luz emitida, que é igualmente proporcional [49].

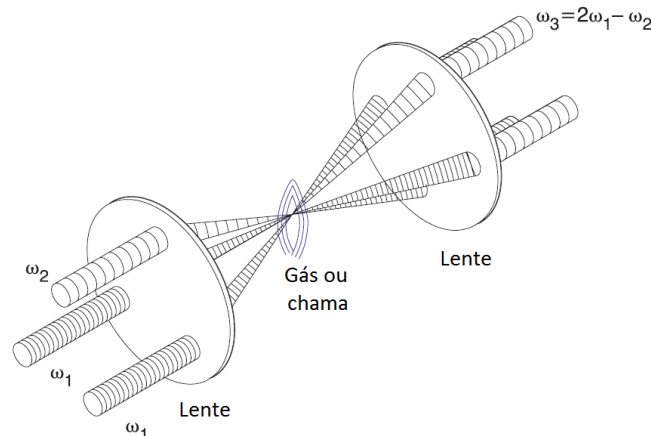


Figura 4.28 – Esquema de um dispositivo de medição de temperatura CARS [43]

4.6.6 DFWM - Degenerative four wave mixing

O método DFWM é semelhante ao CARS, mas utiliza três feixes com diferentes frequências e, conseqüentemente, afetará a frequência de saída. Esta alteração traz várias vantagens face ao método CARS, nomeadamente a correção das condições de fase, a não ocorrência do efeito de Doppler, amplificação dos sinais de saída e diminuição de irregularidades associadas aos feixes [50].

4.6.7 Termografia acústica

A termografia acústica, tal como o nome sugere, baseia-se na variação da velocidade do som com a temperatura, relação esta dada pela expressão seguinte, aplicável tanto a meios sólidos como fluídos.

$$c = \sqrt{\gamma RT}$$

Onde,

c , é a velocidade do som

γ , é o coeficiente de expansão adiabático

R , é a constante universal dos gases perfeitos (J/kg.K)

T , é a temperatura (K)

Nos sólidos, a velocidade do som relaciona-se com o Módulo de Young (E/ρ)^{1/2}, enquanto que nos fluídos relaciona-se com o módulo de elasticidade volumétrico (K/ρ)^{1/2}, podendo ser medida de diferentes formas, recorrendo por exemplo a sonares ou à técnica PTT (*Pulse Transit Time*) [51].

A termografia acústica é uma técnica relativamente mais barata que as anteriormente descritas, para além de apresentar uma gama mais alargada de temperaturas a medir, desde valores próximos do zero absoluto até mais de 5000°C, com uma incerteza de aproximadamente $\pm 5^\circ\text{C}$ [52].

5 Soluções Desenvolvidas

Ao longo deste capítulo são apresentadas as soluções desenvolvidas no decorrer do presente trabalho, tal como as respetivas vantagens e desvantagens de cada uma delas. Já que nenhuma solução encontrada cumpre totalmente os requisitos estabelecidos, são estudadas também as alterações necessárias no sistema original que possibilitam o cumprimento dos objetivos estabelecidos previamente.

As duas soluções propostas diferem fundamentalmente no tipo de transdutor a utilizar (pirómetro ou câmara termográfica), embora o princípio de funcionamento de ambos se baseie na transdução de radiação infravermelha detetada num sinal elétrico de saída, analógico ou digital, proporcional à temperatura do objeto emissor da respetiva radiação. O projeto de cada solução apresentada visa cumprir os objetivos fulcrais da presente dissertação, que incluem a conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico da impressora tridimensional FDM Kühling&Kühling, disponível nas instalações do INEGI. Além disso, foi estudado o modo de implementação deste sistema na impressora 3D, com o objetivo último de possibilitar o fabrico de peças constituídas por plásticos de alta-performance, como o PEEK ou o ULTEM, alargando o leque de componentes produzidos por fabrico aditivo, nomeadamente em aplicações na indústria aeroespacial ou automóvel.

5.1 Primeira Solução

A solução envolve a integração de um pirómetro necessariamente sensível a uma gama específica do espectro eletromagnético na qual os plásticos apresentem elevada emissividade, tendo igualmente em consideração as janelas de transmissão do ar (Figura 4.11). Note-se que a temperatura a ser monitorizada encontrar-se-á entre 200°C a 400°C, intervalo correspondente às temperaturas de extrusão específicas de cada material, pelo que a emissão de radiação por partes destes estará aumentada face à temperatura ambiente. De acordo com a abordagem teórica apresentada no ponto 4.1.2 e tendo em consideração a baixa refletividade dos plásticos a aplicar, a emissividade de um corpo é inversamente proporcional à sua transmissividade, pelo que, através de uma análise da transmissividade espectral de certos plásticos (Figura 5.1), é possível deduzir as principais gamas ótimas de comprimentos de onda às quais será possível realizar a medição de temperatura pretendida.

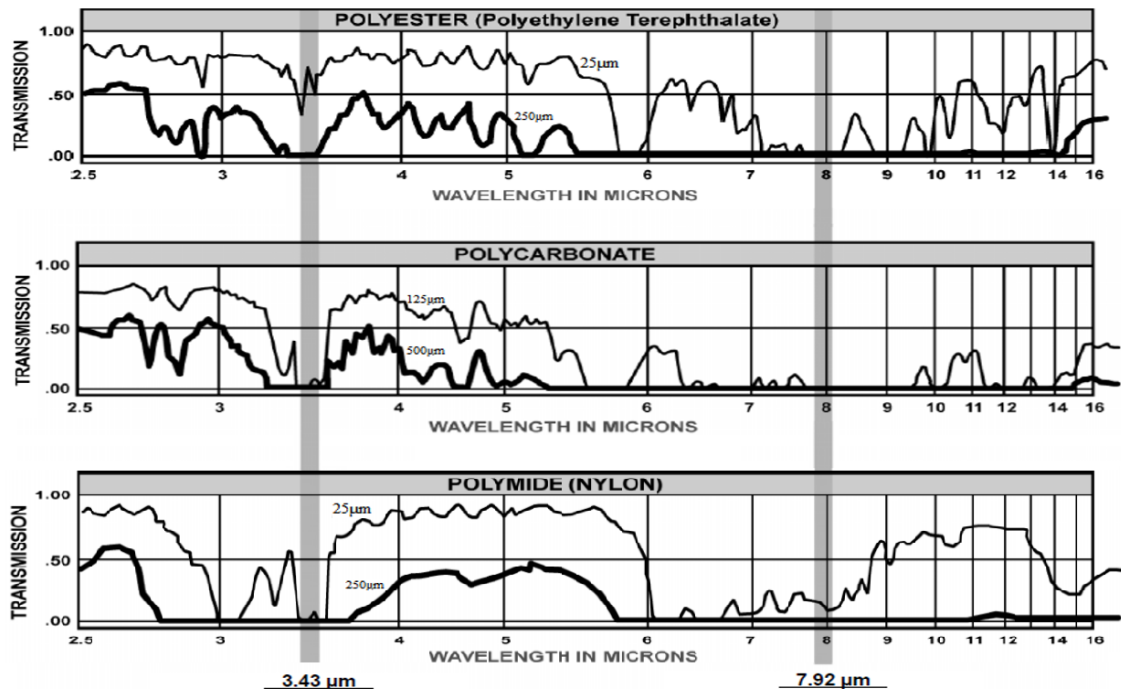


Figura 5.1 – Transmissividade espectral de alguns polímeros e respetivas gamas ideais de medição [53]

O sensor do pirómetro selecionado deve ser o mais restrito possível na gama de radiação à qual é sensível, focando a medição de temperatura nos comprimentos de onda em que a generalidade dos plásticos apresenta altos níveis de emissividade. É possível afirmar através da análise de gráficos de transmissividade espectral de diversos polímeros, como os da Figura 5.1, que os comprimentos de onda ideais para efetuar medições de temperatura por meio de pirómetros serão os $3,43\mu\text{m}$ ou os $7,92\mu\text{m}$. Existe ainda uma gama de elevada emissividade entre 8 e $14\mu\text{m}$, que embora menos restrita, assegura medições de temperatura fiáveis a partir de uma certa espessura de filamento ($500\mu\text{m}$).

Através de uma análise de mercado, rapidamente se percebe a impossibilidade de cumprir em plenitude o requisito de resolução do pirómetro. De facto, nenhum pirómetro apresenta uma resolução capaz de medir um *spot size* de 0.1mm, correspondente à espessura mínima das camadas depositadas pelo bico da impressora 3D. Intercetando o requisito relativo à gama de comprimentos de onda a medir com a resolução do instrumento, as hipóteses reduzem-se de tal modo que apenas é possível obter um pirómetro com *spot size* mínimo de 0.5mm para a gama selecionada mais abrangente: 8 a $14\mu\text{m}$ de comprimento de onda. Fala-se portanto de um pirómetro concebido pela *Optris*, um fabricante especializado na produção de sistemas de medição de temperatura sem contacto, concluindo-se, após uma pesquisa intensiva, que outros fabricantes com reconhecimento na indústria como a *Omega*, *Lumasense*, *Ircon*, *Raytek*, *Micro-Epsilon*, entre outros, embora produzam gamas de pirómetros que permitem obter *spot size*'s de diâmetro tão reduzido quanto o pretendido, apresentam instrumentos demasiado volumosos que excedem os requisitos geométricos da instalação.

No entanto, para viabilizar a solução proposta, torna-se necessário restringir o funcionamento da impressora 3D FDM Kühling&Kühling, instalando a ponteira de 0,75mm de diâmetro (referida na secção 3.2.4) e parametrizando na HMI uma espessura de camada de 0.6mm, correspondente ao valor máximo de espessura aconselhado pelos fabricantes da marca, que afirmam que espessuras superiores a 80% do diâmetro da ponteira instalada não garantem a coesão necessária entre camadas.

5.1.1 Sistema de medição da temperatura

O pirómetro seleccionado, o CTfast LT da *Optris* (Figura 5.2), cumpre de forma impar os requisitos do sistema, já que, embora seja necessário restringir o funcionamento da impressora 3D, nenhum outro pirómetro disponível no mercado permitiria uma monitorização contínua da temperatura do polímero à saída do bico, independentemente do perfil de configurações deste processo aditivo.



Figura 5.2 – Pirómetro Optris CTfast LT

A Tabela 5.1 resume as principais características relevantes para o projeto, desde as condições de funcionamento às especificações de desempenho.

Tabela 5.1 – Especificações do pirómetro CTfast LT [54]

Especificações Gerais		Especificações de medição		
Temperatura ambiente	-20 – 120 °C ¹⁾	Gama de medição térmica	-50 °C – 975 °C	
	0 – 85 °C ²⁾		Gama espectral	8 – 14 μm
Peso	40 g ¹⁾	Resolução ótica		15:1 ³⁾
	420 g ²⁾		25:1 ⁴⁾	
Especificações Eléctricas				
Saída analógica	0/4 – 20 mA	Resolução térmica	0.2 K ³⁾	
	0 – 5/10 V		0.4 K ⁴⁾	
Saída digital	Termopar J, K	Repetibilidade	±0.75% ou ±0.75°C ⁵⁾	
	0/10V (10mA)		Exatidão	±1% ou ±2°C ⁵⁾
	Relé: 2 x 60VDC / 42VAC			Tempo de resposta
0.4 A (isolado)	Saída digital: 4 ms ³⁾ , 3ms ⁴⁾			
Interface digital	USB, RS232, RS485, CAN, Profibus DP, Ethernet			
Cabo	1m (pré-definido), 3m, 8m, 15m			

¹⁾ Sensor; ²⁾ Eletrónica; ³⁾ LT15F; ⁴⁾ LT25F;

⁵⁾ O maior dos dois.

Esta gama de pirómetros diferencia-se em função da resolução ótica em duas classes principais, que determinam certos aspetos de desempenho discerníveis na tabela. Para a presente solução, foi escolhido o sistema ótico de resolução 25:1 com o acoplamento de uma lente CF (*Close Focus*), ideal para obter um *spot size* S mínimo a uma distância de focagem D

bastante próxima da lente. Como se pode confirmar na Figura 5.3 retirada do catálogo do produto, esta potencialidade permite a obtenção de um *spot size* de 0.5mm a uma distância de 8mm, suficiente para a aplicação referida no início da secção 5.1.

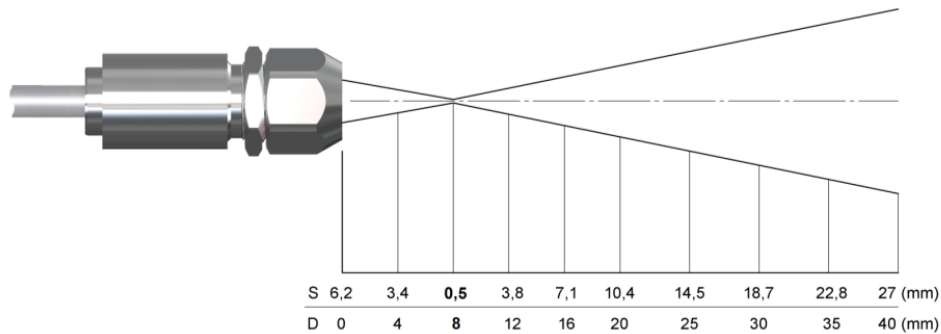


Figura 5.3 – Relação D:S da lente *Close Focus* com resolução ótica 25:1 [54]

A componente eletrónica do pirómetro permite o processamento inteligente de dados em tempo real, que, acrescentando ao facto deste pirómetro apresentar tempos de resposta extremamente reduzidos, permite um processo contínuo de monitorização térmica de objetos, mesmo que estes se encontrem em movimento. Em casos em que a velocidade dos objetos é elevada, a obtenção de uma linha de progressão da temperatura só é possível por comunicação *bus* RS485, mas no caso de estudo, assumindo que se vai utilizar uma ponteira de diâmetro 0,75mm, a velocidade de extrusão não deve ultrapassar os 20mm.s⁻¹, pelo que é possível ter em consideração outros modos de comunicação [8].

É ainda de realçar que o referido pirómetro vem munido de um *software* compatível com a eletrónica do transdutor, que permite, para além da monitorização térmica, uma configuração remota customizada pelo utilizador, ou outros ajustes automáticos, como a emissividade.

5.1.2 Instalação do sistema

Visto tratar-se de um dos pirómetros de elevada velocidade de resposta com menores dimensões e peso, é viável acoplar o sensor à cabeça da impressora sem comprometer o funcionamento ou estabilidade desta. O facto da componente eletrónica se encontrar fisicamente separada do sensor também contribui para que seja instalado de forma mais cómoda e discreta, para além de aumentar a janela de temperaturas de funcionamento do sensor, que poderia ser restringida pela eletrónica, já que esta suporta temperaturas mais reduzidas. Usufruidando desta capacidade, a componente eletrónica deve ser instalada na parte exterior da câmara de impressão, à temperatura ambiente da sala, e o sensor, ligado por cabo à eletrónica, deve ser instalado na cabeça da impressora, de forma a acompanhar o polímero à saída do bico. Note-se que a temperatura ambiente da câmara da impressora não ultrapassa os 70°C, em condições normais de funcionamento, valor que se encontra dentro da gama de operação do sensor. Assim, em condições normais não seria necessária refrigeração adicional. Todavia, devido à proximidade entre o pirómetro e o bloco de aquecimento da cabeça da impressora 3D, obrigatória para viabilizar a medição da temperatura de extrusão, como será abordado seguidamente, é necessário recorrer à refrigeração do pirómetro devido à intensa convecção térmica que ocorre junto à ponteira.

Por outro lado, embora não se preveja que a distância entre o sensor e a componente eletrónica seja muito elevada, o cabo que os une terá que apresentar um maior comprimento de maneira a percorrer toda a esteira porta-cabos, tornando um problema trivial já que o fabricante disponibiliza uma pluralidade de cabos para o pirómetro com diferentes comprimentos (entre 1 a 15m), possibilitando assim que o sensor acompanhe todos os movimentos de deposição. É igualmente essencial preservar os 8mm de distância entre a lente do sensor e o ponto a monitorizar, que garantem um *spot size* de 0.5mm, fundamental para que a medição seja

corretamente efetuada no filamento de 0.6mm, tal como anteriormente mostrado na Figura 4.15. Esta distância deve manter-se inalterada ao longo do processo de monitorização, o que pode ser facilmente conseguido já que o movimento do sensor será solidário ao de deposição do plástico, desde que não ocorram fenómenos de vibração. Como já referido, esta relação D:S de alta resolução apenas é conseguida pela introdução de uma lente *Close Focus*, como é ilustrado na Figura 5.4, lente esta que contribui para um aumento de volume do instrumento e por isso torna-se relevante no estudo geométrico da instalação. Dada a proximidade entre o pirómetro e o bico da impressora 3D todos os pormenores dimensionais são fundamentais para garantir que os requisitos de desempenho são cumpridos.

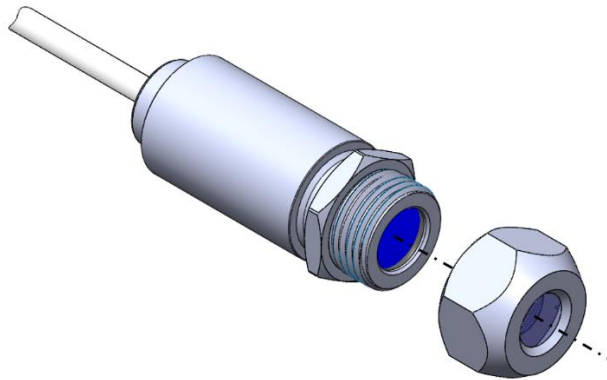


Figura 5.4 – Acoplamento da lente Close Focus no pirómetro CTfast LT

Como se pode observar na Figura 5.5, existe uma impossibilidade de medição da temperatura do filamento extrudido segundo a geometria atual da impressora 3D Kühling&Kühling, já que o bloco de aquecimento, elemento de forma prismática retangular, não permite uma aproximação de 8mm entre o pirómetro e o filamento, requerida para medir de forma efetiva a temperatura de extrusão.

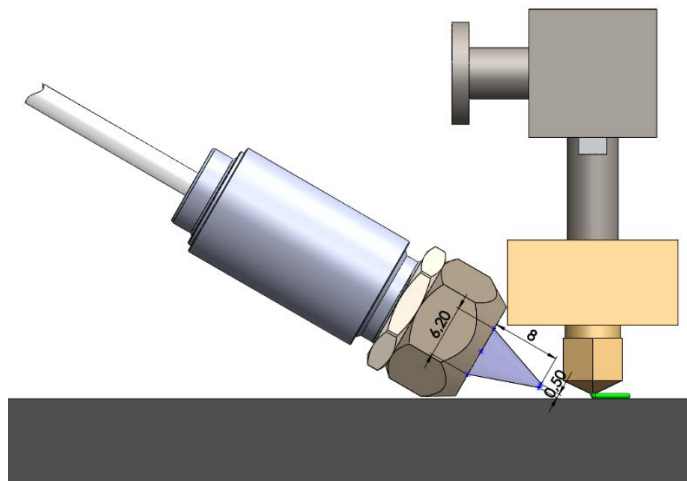


Figura 5.5 – Relação geométrica entre o pirómetro, o respetivo D:S e a ponteira de 0.75mm fornecida pelo fabricante de impressora 3D Kühling&Kühling

Posto isto, propõe-se o recurso à modificação da cabeça da impressora 3D, aumentando a distância entre o ponto de saída do plástico extrudido e o bloco de aquecimento. A forma mais acessível e eficaz de efetuar esta alteração será elaborar uma nova ponteira, igualmente com diâmetro de 0.75mm, mas com um comprimento superior que permita a aproximação do pirómetro. Na Figura 5.6 apresenta-se a geometria proposta para o novo bico a instalar na impressora, salvaguardando que é necessária uma recalibração geométrica desta devido ao aumento da altura total da cabeça. Caso contrário é apenas possível compensar esta variação por regulação do comprimento do tubo de aço que transporta o plástico extrudido até ao bloco

de aquecimento, libertando o seu deslocamento axial por desencravamento da maçaneta de aperto (ambos os elementos referidos encontram-se igualmente representados na Figura 5.5).

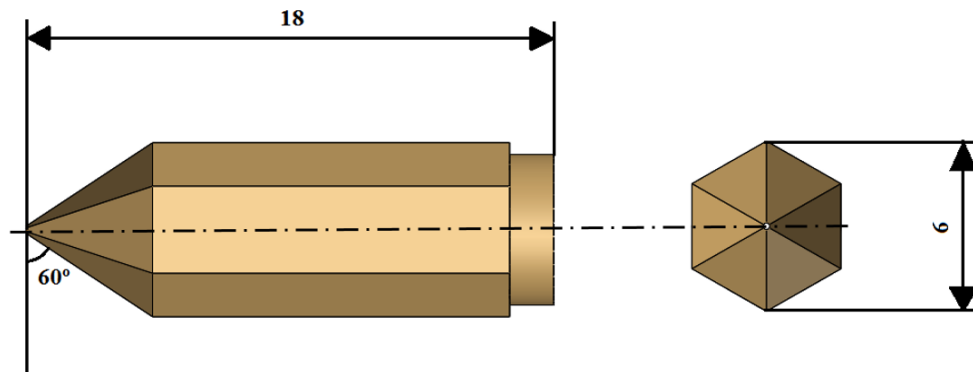


Figura 5.6 – Modelação do novo bico da impressora, compatível com o pirómetro da primeira solução

Note-se que um aumento da altura do bico da impressora implica uma maior dissipação térmica desde o bloco de aquecimento até ao ponto de extrusão, já que a área em que se dá a transferência de calor aumenta proporcionalmente, o que conseqüentemente provoca uma maior variação de temperatura desde um ponto até ao outro. De forma a diminuir esta perda, será relevante diminuir a área da superfície do bico da impressora (optou-se por uma secção hexagonal ao invés de uma cilíndrica) e que este seja produzido num material com elevado coeficiente de condução, para garantir que o próprio bico se encontre a temperaturas próximas do bloco de aquecimento aquando da extrusão. Caso não seja possível eliminar as perdas, é importante ter em consideração que o plástico será extrudido a temperaturas algo mais baixas, podendo ser necessário compensar esta variação com um aumento da temperatura do extrusor. No entanto, esta alternativa não é de todo a mais desejável, já que este aumento de temperatura do extrusor vai fazer com que o próprio polímero atinja valores térmicos superiores aos previstos, aproximando a sua temperatura à de decomposição.

Verifica-se na Figura 5.7 que com o novo bico projetado é possível efetuar a medição de temperatura do filamento com a relação D:S pretendida ($D=8\text{mm}$; $S=0.5\text{mm}$), verificando-se que para além da distância D ser respeitada, o campo de abertura ótico representado pelo cone roxo não apresenta nenhuma interferência no percurso desde a lente até ao filamento, especificação que foi garantida por alteração do ângulo do novo bico em relação ao original aquando da determinação da sua geometria.

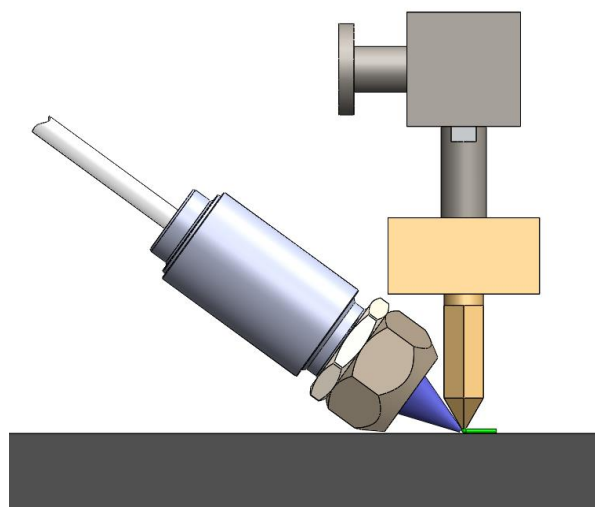


Figura 5.7 – Disposição geométrica do pirómetro CTfast LT com o novo bico modelado

De realçar também na figura anterior a proximidade entre o instrumento de medição de temperatura e o conjunto extrusor que, como já referido, pode provocar um sobreaquecimento dos componentes do pirómetro que pode levar a um comportamento anómalo ou mesmo a danos indesejáveis. De forma a contornar este problema, propõe-se a adição de uma placa refrigeradora em contacto com uma superfície do suporte do pirómetro, podendo ser alimentada pelo mesmo sistema de refrigeração disponibilizado pela impressora 3D Kühling&Kühling, tal como o elemento destacado na Figura 5.8.

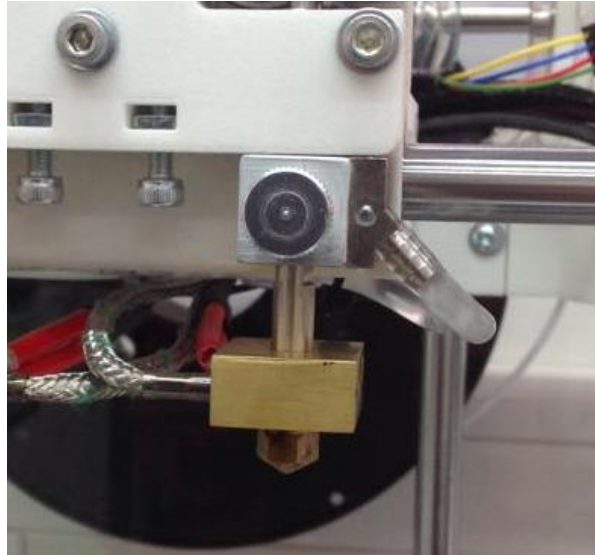


Figura 5.8 – Placa de refrigeração a água de um elemento da cabeça da impressora 3D FDM Kühling&Kühling

A necessidade de criação de um sistema de suporte do pirómetro visa responder à necessidade de o fixar na posição pretendida para a correta medição da temperatura do filamento à saída do bico, podendo ainda integrar o sistema de refrigeração referido acima através do acoplamento de uma placa de refrigeração.

Tendo em consideração que o suporte deve fornecer uma ligação estável entre o pirómetro e a cabeça da impressora 3D, seleccionou-se a peça destacada a azul na Figura 5.9 para possível substituição por uma que integre o sistema de suporte do pirómetro.

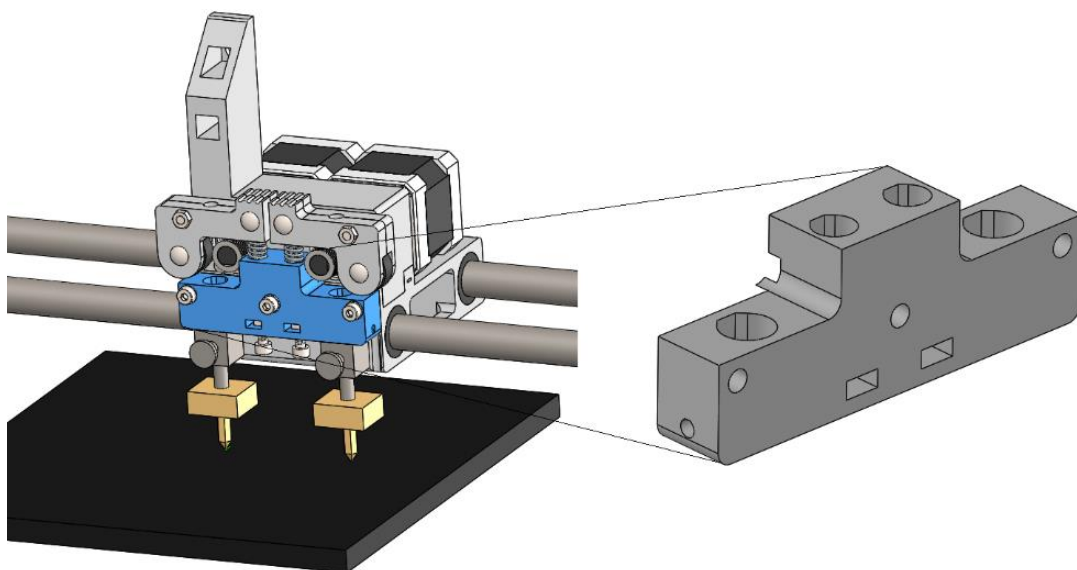


Figura 5.9 – Peça que permite o acoplamento do suporte do pirómetro à cabeça da impressora 3D

Partindo da forma original desta peça, constituinte da cabeça da impressora, acrescentou-se uma geometria compatível com o sistema, tal como a proposta na Figura 5.10. É também representado na ilustração da direita a forma como o pirómetro se deve unir ao suporte - através

da força de aperto exercida pela porca hexagonal roscada no pirómetro, anteriormente à colocação da lente *Close Focus*.

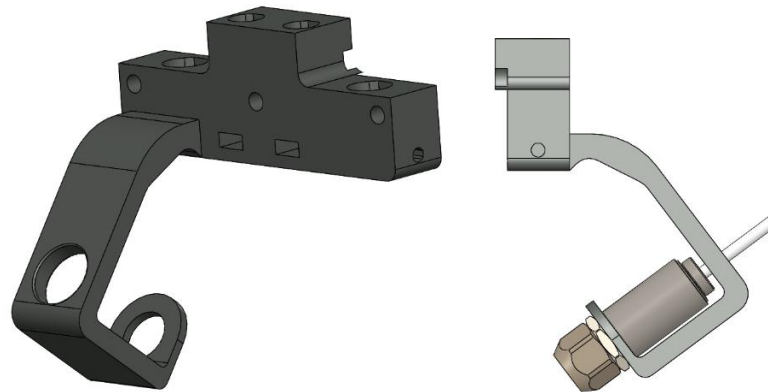


Figura 5.10 – Geometria do suporte do pirómetro e respetivo acoplamento

Visto que a geometria compreende apenas uma proposta de suporte que demonstra a viabilidade geométrica da solução, não foi realizado um estudo, por exemplo pelo método dos elementos finitos, da influência do momento fletor provocado pelo peso do pirómetro, embora se tenha tido em atenção este fator na sua conceção. Contudo, tendo em consideração que a massa do elemento sensor do pirómetro é de apenas 40g, não é esperado que com a geometria proposta existam problemas relacionados com as forças inerciais inerentes ao sistema, forças estas que poderiam resultar numa deformação ou vibrações indesejáveis.

Na Figura 5.11 mostra-se a cabeça da impressora com o sistema de suporte instalado, juntamente com o pirómetro que se encontra acoplado a este. Note-se que esta peça é colocada precisamente da mesma forma que a original representada na Figura 5.9. Foi tomado em atenção que a geometria do suporte não influenciasse certos processos de montagem, como a colocação dos três parafusos M4 de cabeça cilíndrica com oco hexagonal (a azul na Figura 5.14) que conferem estabilidade à peça, o manuseamento da já mencionada maçaneta de aperto do tubo condutor de filamento ou mesmo a colocação das duas porcas a serem roscadas por outros dois parafusos M4 que determinam a tensão das molas, também representadas na Figura 5.14.

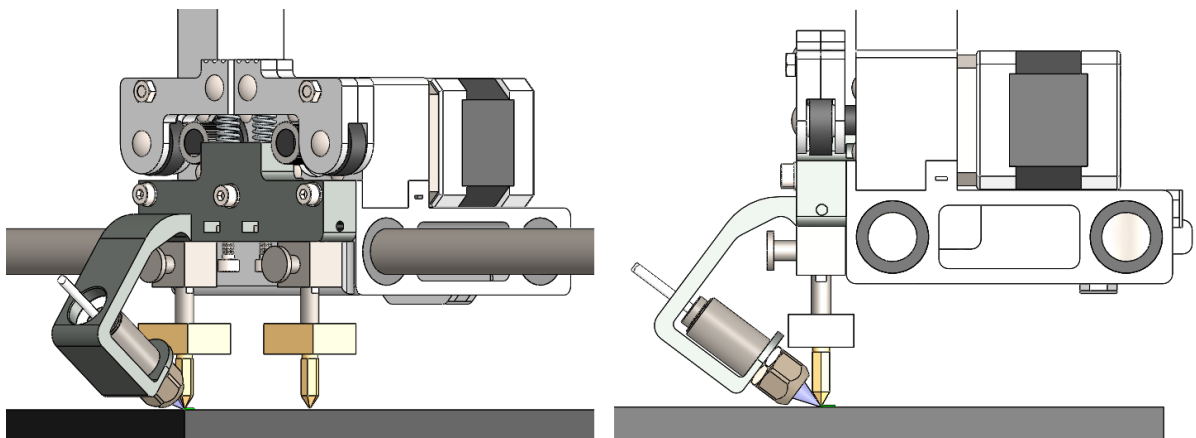


Figura 5.11 – Cabeça da impressora 3D com o pirómetro e respetiva geometria de suporte instalados

Vários aspetos tornam natural uma inclinação para os metais, na escolha do material do suporte, propondo-se como potencial escolha o alumínio. Destaca-se:

- A proximidade da sua superfície com o bloco de aquecimento requer um elevado ponto de fusão;
- A dinâmica associada aos movimentos de impressão requer uma elevada rigidez por parte do suporte de forma a não ocorrerem vibrações que perturbem as medições de temperatura por parte do pirómetro;

Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM

- A reduzida espessura da geometria do suporte vai tornar a estrutura mais suscetível à flexão, requerendo boas propriedades mecânicas do material que a vai compor, como um elevado módulo de Young;
- Pretendendo-se que o suporte contribua para a refrigeração do pirómetro, é requerido que o material deste apresente boa condutividade térmica.

Com vista a otimizar a refrigeração do pirómetro, que vai estar sujeito a um elevado fluxo térmico de convexão oriundo do bloco de aquecimento, a superfície inferior do suporte deverá estar acoplada a uma placa de refrigeração a água similar às utilizadas para refrigerar os motores passo-a-passo da impressora, como se pode ver na Figura 5.12. Esta solução vai permitir que a área de refrigeração seja grande o suficiente para englobar todo o pirómetro, já que se prevê que tanto a superfície inferior do suporte como o anel concêntrico com o sensor se encontrem a baixas temperaturas, resultante do equilíbrio térmico com a placa refrigeradora.

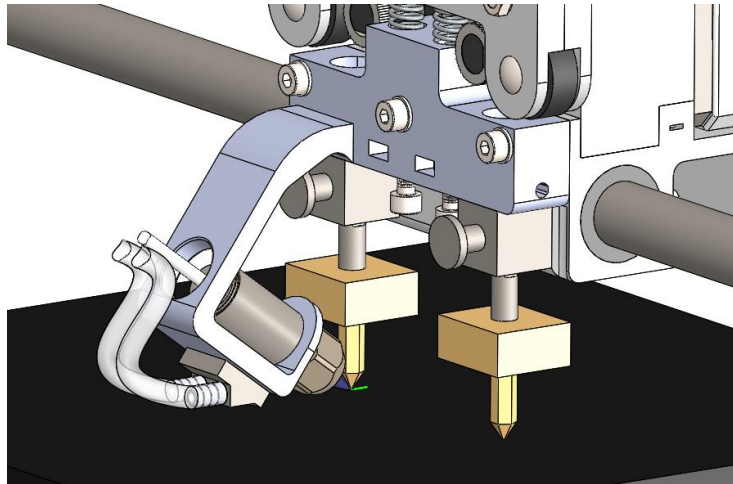


Figura 5.12 – Sistema de refrigeração do pirómetro integrado na geometria de suporte

Os tubos transportadores da água que alimentam a placa de refrigeração devem percorrer o mesmo percurso que o cabo de comunicação entre o sensor e a eletrônica do pirómetro, juntando-se à restante cablagem na calha porta-cabos articulada (Figura 5.13), situada na zona superior da impressora, que realiza o seu transporte para o exterior da câmara de impressão, onde se encontra tanto a eletrônica como a bomba de água.



Figura 5.13 – Calha porta-cabos articulada da cabeça da impressora

Poderia ainda ser projetada uma solução alternativa para o suporte que permitiria a sua remoção sempre que fosse desejado operar com a impressora tridimensional na sua configuração de origem. Esta alternativa envolve a utilização de uma geometria algo semelhante à acrescentada na peça anteriormente alterada, mas em contraste a esta o acoplamento do suporte seria realizado apenas por meio dos parafusos destacados a azul na

Figura 5.14, sendo as anilhas também visíveis na figura substituídas por uma chapa pertencente ao suporte.

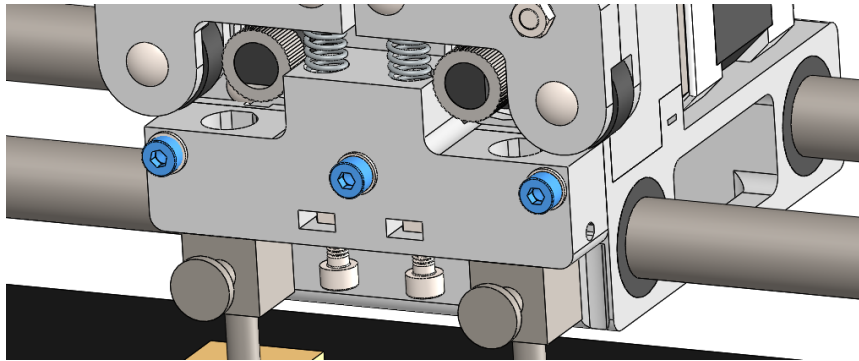


Figura 5.14 – Parafusos que viabilizam o acoplamento de um suporte do pirómetro amovível

Note-se que apenas foi idealizada a geometria do suporte para um pirómetro que apenas monitoriza a temperatura de extrusão do filamento da ponteira primária. Caso seja eventualmente de interesse monitorizar a temperatura do filamento da ponteira secundária, basta obter um segundo pirómetro e acoplá-lo ao sistema com um suporte simétrico à geometria concebida, sendo tal justificável pela simetria da própria cabeça da impressora 3D.

5.1.3 Implementação do sistema de controlo

Após análise das estruturas de controlo apresentadas na secção 3.2.2, concluiu-se que a solução mais eficiente para processamento de dados oriundos do pirómetro é o controlo indireto da temperatura de extrusão. A solução implica a introdução de um microprocessador externo que providencie o tratamento de dados necessário antes da sua transmissão ao processador interno da impressora como é visível na Figura 5.15. Note-se que o sistema de controlo original da impressora FDM *Kühling&Kühling*, embora receba o *feedback* do termopar referente à temperatura do extrusor fechando parte da malha, encontra-se em malha aberta quando se engloba a temperatura de deposição do polímero. Como já mencionado, a necessidade de controlar esta variável leva à criação de uma malha fechada nos limites do sistema a partir da monitorização da temperatura de extrusão pelo pirómetro e controlo desta por adição de um controlador externo que comunica com o controlador interno.

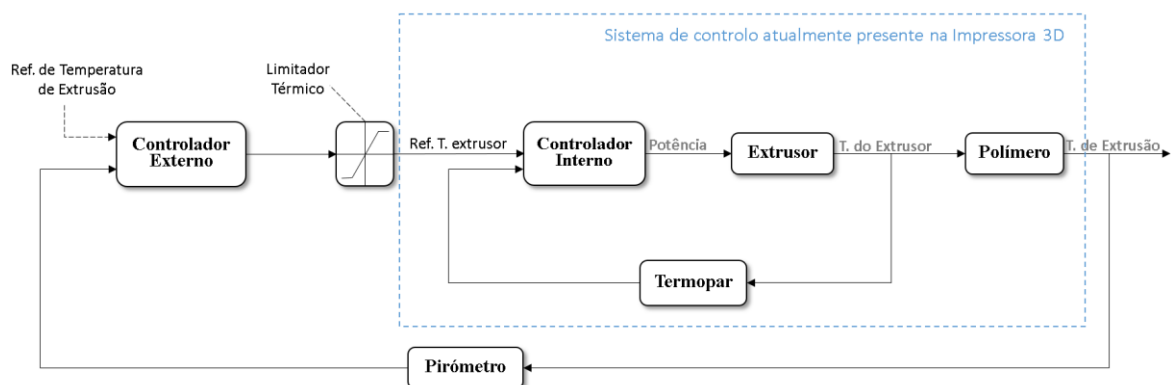


Figura 5.15 – Complementação do sistema de controlo atual da impressora 3D por integração do pirómetro

O sistema de aquisição de dados, constituído pelo sensor e componente eletrónica do pirómetro, fornece um sinal de saída relativo à temperatura do polímero à saída do bico, variável distinta da variável de temperatura controlada pelo sistema de controlo da impressora. Visto que a variável a controlar é a temperatura da própria ponteira (temperatura do extrusor), determinada pela potência fornecida ao sistema, é necessário que o microprocessador externo receba o sinal relativo à temperatura do polímero e o processe através de um algoritmo de controlo, de forma a originar um sinal de saída relativo à temperatura que é necessário impor à

5.2 Segunda Solução

A presente solução envolve a aplicação de uma câmara termográfica com a capacidade de monitorizar em tempo-real a temperatura de extrusão de plásticos por parte da impressora 3D, seja ela realizada pela ponteira primária como pela secundária. Para que esta medição seja corretamente efetuada, é necessário ter igualmente em consideração diversos requisitos anteriormente referidos na secção 5.1, nomeadamente a resolução do instrumento, a gama de comprimentos de onda à qual é sensível e a gama de temperaturas à qual realiza medições térmicas corretas e precisas.

Relativamente à resolução ótica, verifica-se a existência de uma variedade de câmaras termográficas no mercado que permitem a obtenção isolada da temperatura de uma área bastante mais reduzida que a conseguida pelos pirómetros, podendo mesmo chegar a áreas inferiores a 0.01mm^2 . Note-se que a referida área corresponde à dimensão de um único pixel, tendo este a geometria de um quadrado com 0.1mm de lado, neste caso. No entanto, os fabricantes de câmaras termográficas aconselham uma dimensão mínima da superfície do objeto a medir correspondente a 9 pixéis (3×3 pixéis), de forma a reduzirem os potenciais erros e assim garantirem que as medições de temperatura realizadas pelas suas câmaras sejam fiáveis. É ainda necessário ter em conta que embora exista uma resolução definida para uma dada câmara, a dimensão real da área da superfície correspondente a um pixel depende também da lente instalada na câmara e varia de acordo com a distância entre o objeto e esta, pelo que é necessário que a distância seja bem definida e constante para monitorizar corretamente a temperatura do filamento extrudido, não podendo, no entanto, ser inferior a um certo valor ditado pelo ângulo visual da lente, por questões de focagem.

Procurando encontrar uma câmara termográfica sensível a uma gama de comprimentos de onda o máximo restrita e que englobe os comprimentos de onda para os quais os polímeros apresentam elevada emissividade, tais como os mostrados na Figura 5.1, verificou-se a existência de câmaras termográficas de reduzidas dimensões sensíveis apenas à radiação eletromagnética espectral de $7.9\mu\text{m}$. Vocacionalmente projetadas para medirem a temperatura de superfície vítreas, estas podem também ser aplicadas a filamentos de reduzida espessura, já que ambos apresentam elevada transmissividade na maior parte do espectro eletromagnético com exceção de alguns comprimentos de onda comuns na zona de radiação infravermelha, como é o caso dos $7.9\mu\text{m}$. Estas câmaras, graças à evolução nano-tecnológica, existem em dimensões bastante reduzidas para conseguirem monitorizar temperaturas de pontos de difícil acesso, o que as torna, juntamente com outros fatores, apelativa para a aplicação estudada.

Concluiu-se que existe uma pluralidade de fabricantes que disponibilizam câmaras termográficas capazes de cumprir os requisitos de desempenho descritos, destacando-se a *Flir*, a *Optris* e a *Xenics* com os produtos mais aliciantes para aplicações industriais de automação. Após análise detalhada da oferta de produtos das referidas marcas, optou-se pela escolha de uma câmara termográfica da *Optris* por ser a única a apresentar uma solução que, para além de uma gama espectral estreita e adequada à aplicação, alia uma reduzida dimensão e peso com uma resolução ótica e térmica bastante aceitável face ao custo e ainda uma tolerância considerável a temperaturas ambiente severas. Na verdade, embora a *Flir* se encontre na vanguarda da termografia, os instrumentos projetados pelo fabricante para aplicações de automação apresentam dimensões demasiado elevadas para o espaço disponível para o sistema de medição do presente trabalho. Por outro lado, a *Xenics* mostra-se competitiva na questão dimensional dos seus produtos, mas nenhum destes apresenta uma gama de comprimentos de onda mais interessante para a medição da temperatura de filamentos de plástico, tendo como única solução válida a janela de $8\text{-}14\mu\text{m}$, menos restrita que os $7.9\mu\text{m}$ medidos pela câmara da *Optris* selecionada. Observou-se ainda que as câmaras comercializadas pela *Micro-Epsilon* são em tudo idênticas às da *Optris*, mas com um custo acrescido.

5.2.1 Sistema de medição da temperatura

A câmara termográfica da *Optris* selecionada, a PI 450 G7 (Figura 5.18), cumpre a totalidade dos requisitos estabelecidos para o presente projeto, não existindo necessidade de nenhuma restrição de funcionamento da impressora tridimensional *Kühling&Kühling*.



Figura 5.18 – Câmara termográfica da Optris PI 450 G7

A Tabela 5.2 resume as principais características relevantes para a aplicação, desde as condições de funcionamento às especificações de desempenho.

Tabela 5.2 – Especificações da câmara termográfica PI 450 G7 [55]

Especificações	
Resolução ótica	382 x 288 pixels
Sensor	Focal Plane Array (FPA) Micro-bolómetro não refrigerado 25 µm x 25 µm
Gama espectral	7.9 µm
Gama de medição térmica	200 – 1500 °C
Frequência de fotografamas	80 Hz (comutável para 27 Hz)
Lentes (FOV)	38° x 29° (f = 15 mm) 62° x 49° (f = 8 mm) 80° x 58° (f = 7.3 mm)
Resolução térmica	130 mK
Exatidão	±2 °C ou ± 2 % (o maior dos dois)
Interface	USB 2.0, PIF
Comprimento do cabo	1m (pré-definido), 5m ou 10m
Temperatura ambiente	0 – 70 °C
Dimensões	46 mm x 56 mm x 90 mm
Peso	320 g

As especificações únicas desta câmara termográfica permitem o cumprimento de todos os requisitos do sistema, embora seja necessário tomar em consideração alguns aspetos relativos às restrições térmicas, geométricas e mesmo de desempenho. Começando por abordar as questões térmicas, verifica-se que a gama de medição abrange a totalidade de temperaturas de extrusão dos diferentes plásticos que se pretendem utilizar na impressora 3D, como se pode confirmar na Figura 3.3. Por outro lado, embora a gama de temperaturas a que a câmara pode operar se encontre dentro dos limites de temperatura ambiente definida pelos fabricantes da impressora 3D, o valor máximo, 70°C, é coincidente, pelo que é de bom tom evitar que a câmara opere no limite do aceitável. Posto isto, surge a necessidade apresentar uma proposta de refrigeração ou isolamento juntamente com esta, proposta esta que será analisada de forma mais detalhada na secção seguinte.

Fazendo a ligação entre a análise térmica e geométrica da PI 450 G7, é ainda de realçar que o seu peso e dimensões reduzidas garantem uma certa margem para a adição do isolamento sem comprometer o correto processo de impressão, visto que é fundamental respeitar geometria da impressora 3D e o respetivo espaço disponível para a instalação da câmara. Para assegurar que tal é exequível, torna-se necessário seleccionar uma lente adequada à aplicação, ou seja, que permita a uma certa distância imposta pelos requisitos geométricos discernir de forma isolada a temperatura do filamento, fator que é definido pela resolução espacial do instrumento. Assim sendo, seleccionou-se entre as óticas disponibilizadas pela *Optris* para a câmara termográfica apresentada a lente de 62° x 49°. O fabricante alerta para o facto destas lentes, pertencentes à família de objetivas grande-ocular, distorcerem radialmente os pontos mais afastados do centro do foco mas, caso seja utilizado o *software* de monitorização disponibilizado de forma livre para esta gama de câmaras, o mesmo compensa este fenómeno de forma automática.

A *Optris* disponibiliza na sua página um *software* que permite calcular a relação entre o FOV (*Field of View*) e a distância focal, definindo desta forma a distância ideal que permite, para além de capturar ambos os bicos da impressora 3D, obter um IFOV de 0,1mm (sigla utilizada para definir a largura de uma superfície representada por um pixel). Na captura de tela disposta na Figura 5.19 verificam-se as relações dimensionais que são possíveis obter para a distância focal seleccionada de 39mm.

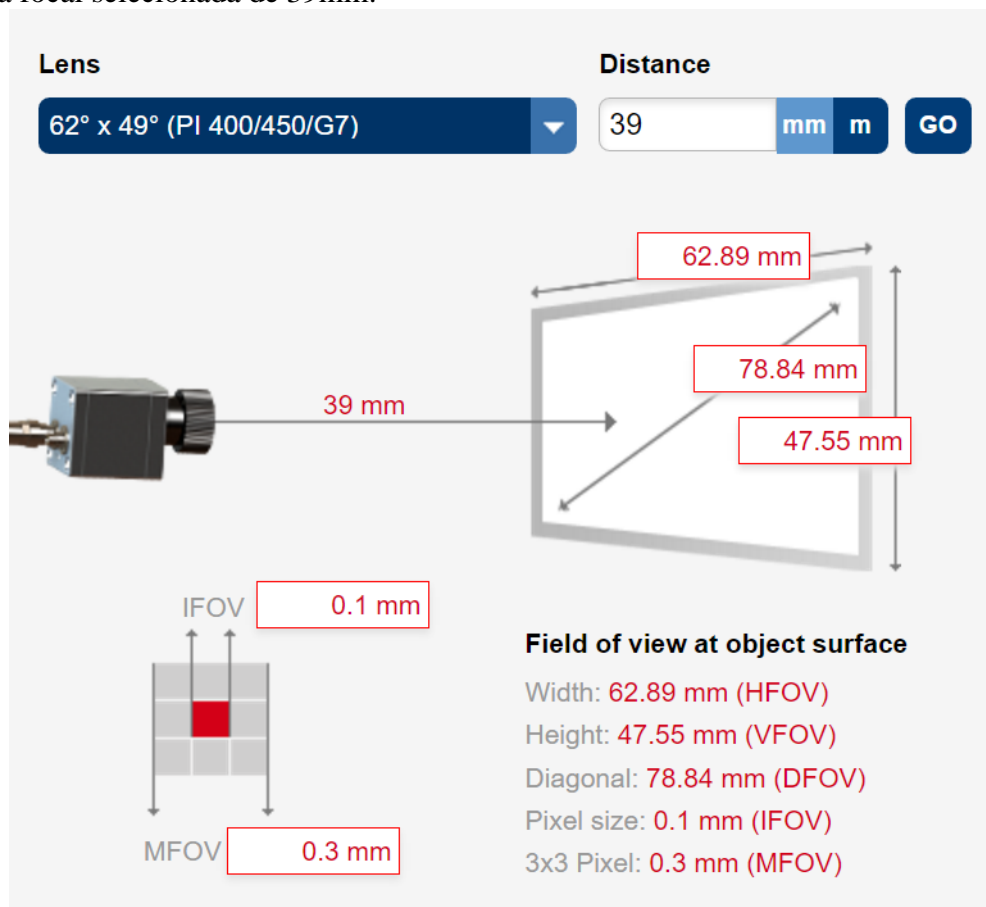


Figura 5.19 – Cálculo da relação entre a distância focal e o FOV da câmara termográfica PI 450 G7 [56]

Tal como na 1ª solução, no momento da aquisição da câmara termográfica é igualmente fornecido ao utilizador um *software* (PI Connect) de manipulação do instrumento, por exemplo por introdução de parâmetros como a emissividade do objeto e temperatura de referência ou ambiente. Para além destes processos de entrada na câmara, o *software* permite a apresentação gráfica da área abrangida pela ótica, bem como a análise da informação adquirida: desde a determinação da temperatura média de uma região seleccionada ou apenas da respetiva

temperatura intrínseca ou fronteira, determinação e monitorização dos pontos de temperatura extrema (máxima e mínima), tal como o acionamento de um alarme definido para valores térmicos mínimos ou máximos. Para além da visualização dos valores mencionados, é disponibilizada a sua evolução temporal na forma de um gráfico, com a opção de armazenamento destes dados, por exemplo em formato *Excel*, ou ainda a sua disponibilização em tempo-real através de bibliotecas “.dll” (*Dynamic-Link Libray*) em *open-source*, de maneira a serem acessíveis noutros processos de controlo industrial, como é do interesse do projeto em estudo. Na Figura 5.20 é apresentada uma captura de tela do ambiente gráfico do *software* “PI Connect”, juntamente com a legendagem de algumas das potencialidades do programa.

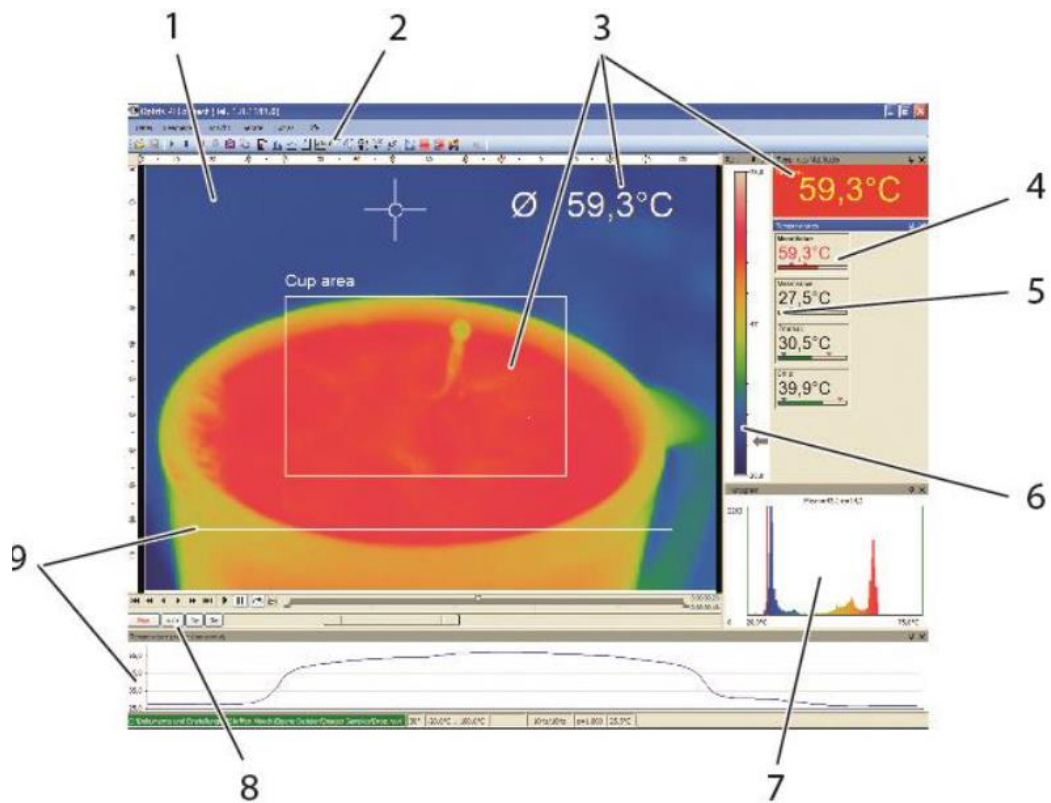


Figura 5.20 – Ambiente gráfico do *software* PI Connect [57]

1. Imagem capturada pela câmara termográfica;
2. Barra de ferramentas;
3. Temperatura média de uma área definida na imagem;
4. Definições de alarme;
5. Mostrador de todas as temperaturas relevantes na área selecionada:
 - Temperatura máxima;
 - Temperatura mínima;
 - Temperatura no cursor;
 - Temperatura interna;
 - Temperatura fronteira;
6. Temperatura de referência: Escala cromática face à temperatura;
7. Histograma representante da distribuição estatística de uma única variável térmica;
8. Escala automática/manual da gama térmica discernível na imagem;
9. Perfil térmico de um máximo de duas linhas definidas na imagem.

5.2.2 Instalação do sistema

Com vista a cumprir os requisitos de desempenho estabelecidos para a presente solução, que envolvem a necessidade de medir a temperatura do filamento isoladamente, é imprescindível que a câmara termográfica seja instalada a uma proximidade tal que torna impraticável a opção de fixar o sistema de medição. Visto que nenhuma câmara termográfica disponível no mercado apresenta uma resolução ótica que permita medir de forma isolada uma área com 0.01mm^2 a distâncias superiores 210mm (distância equivalente ao comprimento do tabuleiro), facilmente se compreende que a solução terá que envolver um sistema de medição móvel e solidário com o movimento da cabeça da impressora, independentemente da câmara selecionada para a função. Na verdade, optando por esta solução é possível seleccionar uma câmara com uma resolução mais baixa - e portanto de menor custo - já que o distanciamento focal pode ser determinado de uma forma mais livre, apenas estando limitado pela geometria da impressora 3D.

Na Figura 5.21 é mostrado que a distância focal definida para a solução (39mm) corresponde à distância mínima imposta pela impressora, permitindo que a câmara PI 450 G7 cumpra os requisitos de desempenho (verificável na Figura 5.19) apenas com uma resolução ótica de 382×288 pixéis e utilizando uma lente de $62^\circ \times 49^\circ$, dispensando a utilização de câmaras termográficas de resolução ótica de 640×480 inevitavelmente mais dispendiosas. Note-se que a disposição da câmara, para além de ser definida pela distância focal necessária para obter um pixel de $0,1\text{mm}$ evitando qualquer colisão com a impressora ou peça a fabricar, é também determinada pelo ângulo dos bicos da impressora, visto que o foco ótico terá que incidir diretamente na superfície do filamento sem nenhuma obstrução. A linha cinzenta visível na Figura 5.21 representa a linha central do foco, que procura ser paralela ao ângulo do bico de forma a assegurar a obtenção de um campo de visão desimpedido para o filamento por parte da câmara termográfica.

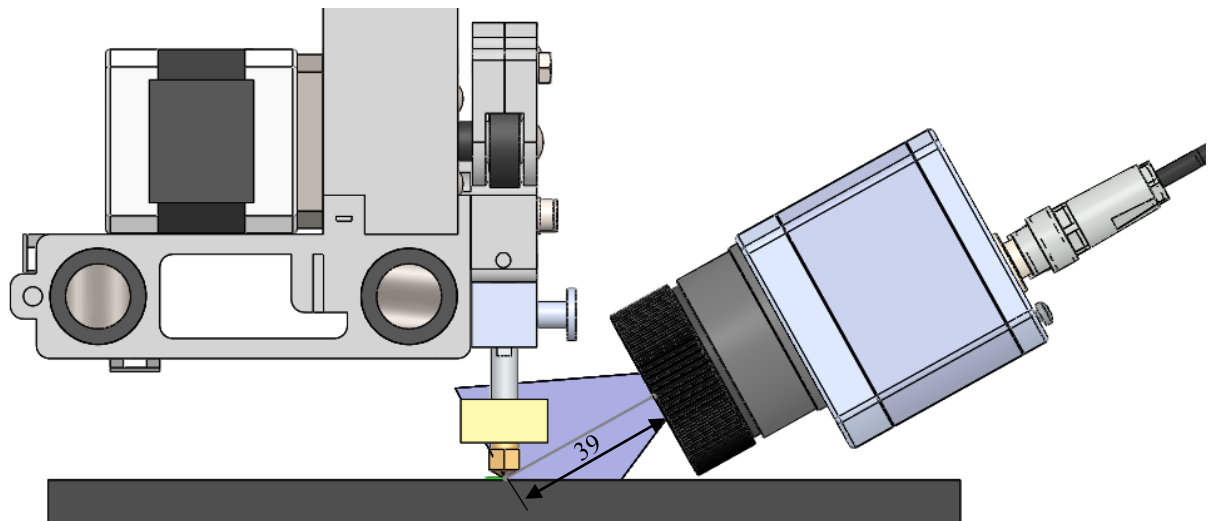


Figura 5.21 - Relação geométrica da câmara PI 450 G7 em relação à impressora 3D Kühling&Kühling

Utilizando novamente a informação disponível na Figura 5.19, sabendo que o valor do campo de visão horizontal (HFOV) para a distância focal de 39mm é de $62,89\text{mm}$ e a distância entre os extremos do bico primário e secundário de $58,54\text{mm}$, pode-se concluir por comparação que a centragem da câmara face aos dois bicos garante que a imagem obtida pela câmara engloba ambos, como se verifica pela área abrangida pelo ângulo sólido azulado na Figura 5.22. Este aspeto torna-se interessante no caso de se desejar obter uma monitorização simultânea de ambos os bicos quando a impressora 3D estiver a operar na função multimaterial, não sendo necessário ocorrer um deslocamento relativo entre a câmara e a cabeça da impressora, eliminando o risco de atrasos de monitorização devido à dinâmica que poderia estar envolvida.

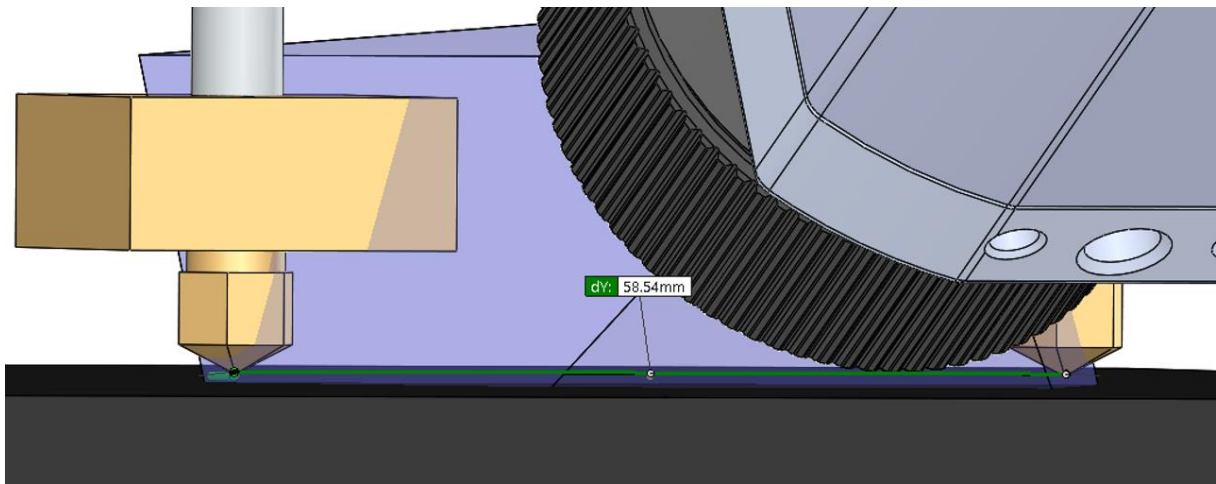


Figura 5.22 – Alcance de ambos os bicos da impressora 3D por parte do campo de visão da câmara PI 450 G7

Como mencionado na secção anterior, é necessário submeter a câmara termográfica a um sistema de segurança térmico que salvaguarde a sua integridade, já que as elevadas temperaturas atingidas dentro do ambiente de impressão podem danificar a eletrónica ou provocar outros problemas mecânicos, como a desintegração das juntas. Para além do próprio sistema de aquecimento da câmara de impressão, que pode ir até aos 70°C, a proximidade já observada entre a câmara e a zona de fundição e deposição de material faz com que esta esteja sujeita a fluxos térmicos convectivos oriundos do bloco de aquecimento, o que consequentemente contribui ainda mais para o aquecimento do sistema de medição.

A *Optris* comercializa um conjunto de caixas de refrigeração (denominadas por *Cooling Jackets*) para a toda a gama de câmaras PI que permite a sua integração em ambientes com temperaturas até aos 240°C, ou até mesmo aos 315°C, caso se utilize a versão *Cooling Jacket Advanced* correspondente a uma solução mais robusta.



Figura 5.23 – Versão mais compacta do *Cooling Jacket* da *Optris* e respetivo suporte de montagem

Embora o *Cooling Jacket* cumpra com distinção os requisitos de segurança térmica da câmara PI 450 G7 para o presente projeto, a sua robustez inviabiliza a sua implementação física na câmara da impressora tridimensional. Por um lado, a sua elevada dimensão (271mm de comprimento e diâmetro de 108mm) não permite a sua instalação junto da cabeça da impressora sem que ocorram colisões, por outro, a sua elevada massa (5,7 kg) aumentaria de forma significativa a inércia do conjunto móvel, podendo condicionar o funcionamento dos motores de modo a influenciar a dinâmica da impressora e por conseguinte desregular os seus movimentos de deposição. Um cálculo aproximado da massa da cabeça da impressora realizado no *Solidworks* mostra que esta não chegará a metade do peso do *cooling jacket* (2,5 kg), pelo que não é espectável que o sistema de guiamento esteja preparado para tal adição de peso.

Acrescentando à questão do aumento de peso sobre as guias da cabeça da impressora, que aumenta a flecha destes veios, o facto da caixa de refrigeração se encontrar deslocada do centro de massa das guias de suporte do conjunto vai originar um momento que cria forças indesejáveis nas guias, forças estas esquematizadas na Figura 5.24, resultando num desequilíbrio do sistema.

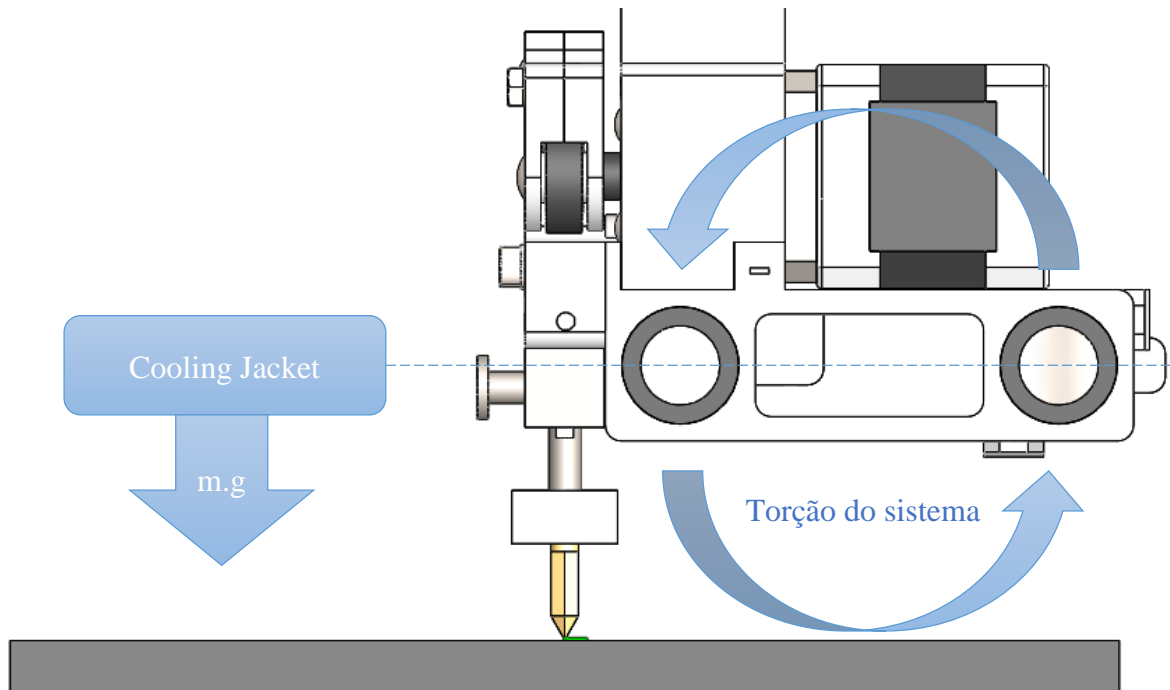


Figura 5.24 – Desequilíbrio do sistema causado pelo *Cooling Jacket*

Com vista a contribuir para a solução dos problemas enunciados, propõe-se a seguinte geometria de uma caixa refrigeradora para alojamento da PI 450 G7, concebida para que seja compatível com o sistema a integrar, geometria esta ilustrada na Figura 5.25.

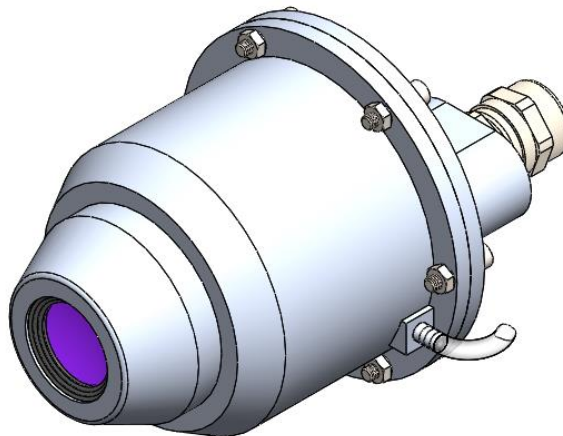


Figura 5.25 – Geometria da caixa refrigeradora para a PI 450 G7

A caixa é composta por um revestimento de 2mm de espessura de alumínio e 5mm de isolante térmico, sendo poliuretano o material seleccionado para realizar o isolamento. A caixa engloba a totalidade da superfície da câmara com exceção da sua componente ótica, que apresenta maior tolerância térmica que a eletrónica do instrumento (limite máximo de 80°C). O equipamento deverá ainda ser dotado de refrigeração a água, constituída por um circuito que percorra a maior distância possível dentro da caixa. Na Figura 5.26 é possível visualizar a geometria proposta para a refrigeração, que será apenas um tubo de cobre serpenteado ao longo do interior da caixa refrigeradora, alimentado por água fria num dos lados da caixa que será expelida na lateral oposta, continuando o seu percurso até à bomba de refrigeração da impressora *Kühling&Kühling*.

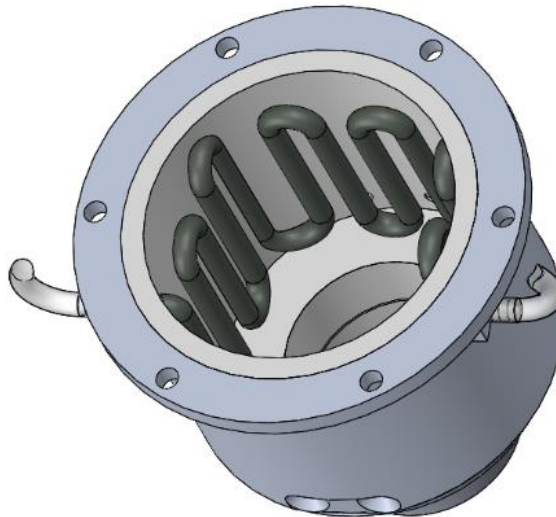


Figura 5.26 – Serpentina de refrigeração da proposta de caixa de proteção térmica da PI 450 G7

O alojamento da câmara termográfica é realizado pela face traseira da caixa, face esta destacada pelo ângulo da figura anterior, sendo a sua fixação assegurada por dois parafusos de aço inoxidável M4 com cabeça de embeber a roscar na zona inferior da caixa, estando um destes visível na Figura 5.27, aproveitando o facto da PI 450 G7 já possuir originalmente esses furos roscados. Também é possível visualizar na figura a estabilidade conferida à câmara no interior da caixa, já que toda a componente ótica se encontra envolvida pelo isolamento, tal como a face inferior da caixa da eletrónica que se encontra apoiada na superfície isolante.

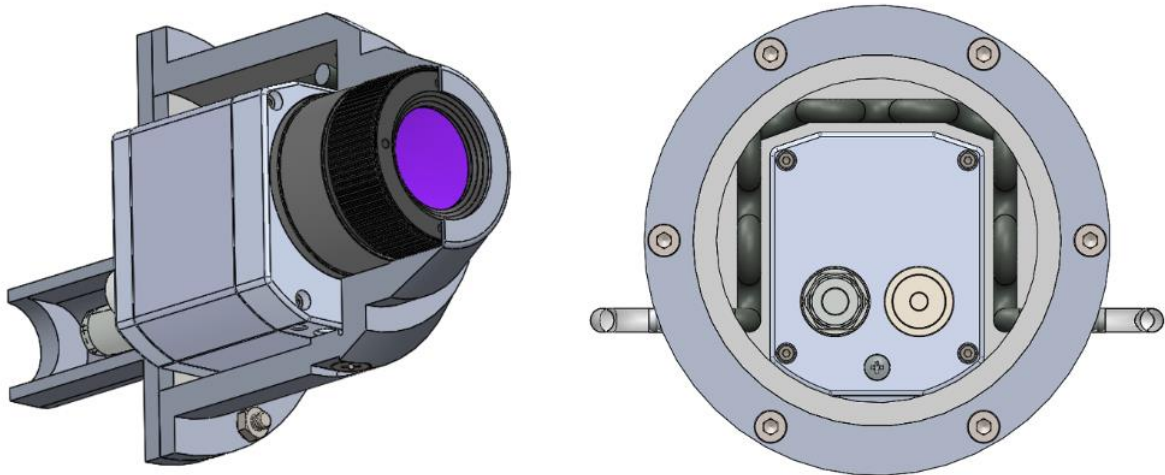


Figura 5.27 – Alojamento da câmara PI 450 G7 na caixa de refrigeração

Relativamente à tampa da caixa de refrigeração que é colocada à posteriori da integração da câmara, esta é constituída apenas por uma flange de alumínio com uma camada de 5mm de poliuretano isolante e um bloco elipsoidal oco que disponibiliza espaço adicional para as fichas de interface da câmara. No extremo do bloco existe um furo roscado para passagem da cablagem que embora seja obturado por um bujão M20, este permite a passagem tanto do cabo USB como do PIF. A fixação da tampa na caixa de refrigeração é executada por 6 parafusos de aço inoxidável M4 com oco hexagonal, dispostos concentricamente aos furos passantes das flanges da caixa e da tampa, roscando em porcas hexagonais M4, tal como a vista explodida representada na Figura 5.28 sugere.

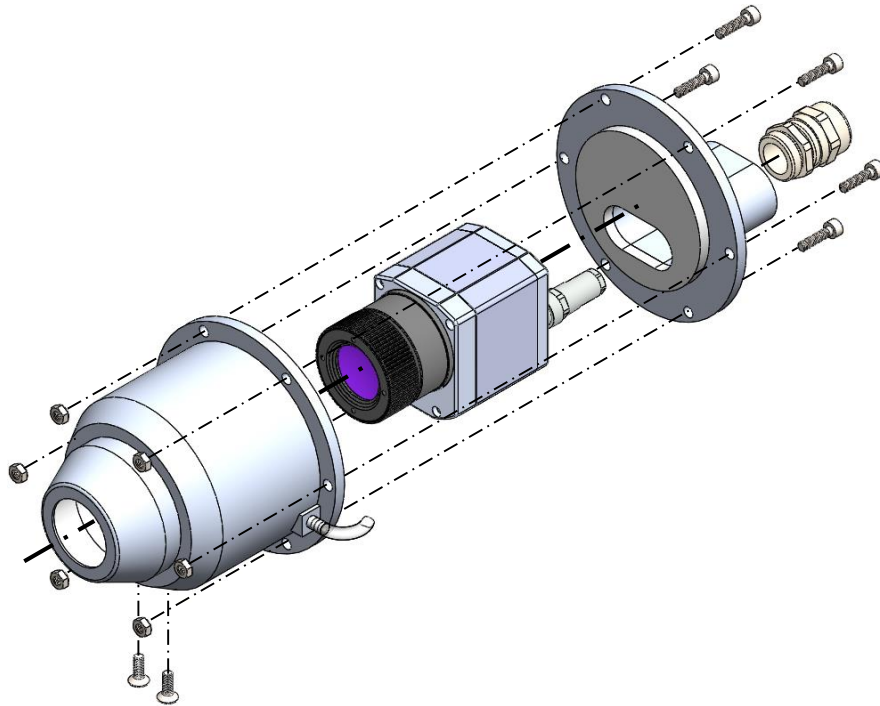


Figura 5.28 – Vista explodida do conjunto PI 450 G7 e caixa de refrigeração

A figura 72 pretende mostrar que a integridade do sistema prevalece com a geometria proposta para a caixa de refrigeração, assegurando-se que todas as colisões continuam a ser evitadas para a mesma distância focal de 39mm. De notar que foi tomado em atenção que o comprimento da caixa não excedesse o disponível para não ocorrerem colisões com as portas da câmara de impressão, quando a cabeça da impressora estiver na posição mais avançada a depositar material no limite do tabuleiro.

Para além da questão geométrica, uma estimativa da massa calculada pelo *SolidWorks* permite prever que a inércia do conjunto proposto condiciona bastante menos a dinâmica do sistema face ao *Cooling Jacket*, já que a massa do conjunto da caixa de refrigeração e a PI 450 G7 será de aproximadamente 1kg, em oposição aos 6kg da solução comercializada pela *Optris*.

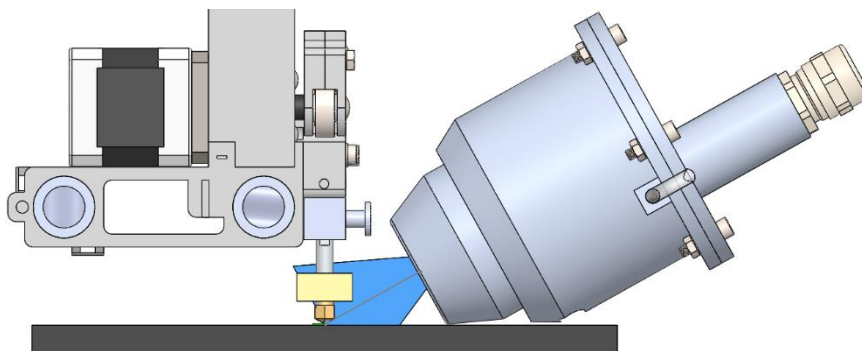


Figura 5.29 - Relação geométrica da caixa de refrigeração da câmara PI 450 G7 em relação à impressora 3D

Foram ainda realizadas duas geometrias adicionais de tampas da zona frontal da caixa de refrigeração de 1mm de espessura de cobre que fornecem uma proteção térmica adicional à lente da câmara termográfica. Esta proposta surge do facto das lentes de germânio da PI 450 G7 se tornarem opacas à radiação infravermelha quando se encontram a mais de 80°C. Posto isto, sabendo que a temperatura do bloco de aquecimento da impressora 3D oscilará muito, dependendo do plástico a extrudir e podendo mesmo chegar aos 400°C de acordo com a análise do gráfico da Figura 3.3, os fluxos convectivos provocados pelo aquecimento do bico da impressora 3D podem eventualmente “cegar” a lente da câmara, o que pode ser impedido por uma barreira física como as apresentadas na Figura 5.30.

A tampa a) apresenta uma ranhura que permite a passagem de radiação, sendo útil para uma aplicação em que seja pretendido que o campo de visão da câmara termográfica englobe ambos bicos da impressora 3D em simultâneo, enquanto que a tampa b), embora confira um barramento mais eficaz aos fluxos convectivos que provêm do bloco de aquecimento, condiciona em muito o campo de visão da câmara termográfica, já que apenas um pequeno orifício permite a passagem de radiação a medir e, por este motivo, apenas é útil para monitorização constante de um dos bicos. Caso se pretenda uma alternância de monitorização entre ambos os bicos utilizando a tampa b), é necessário que a câmara tenha a possibilidade de movimentação relativa em relação à cabeça da impressora, de forma a posicionar o orifício da tampa numa disposição colinear com o filamento do qual se pretende medir a temperatura. Note-se que a colocação destas tampas vai afetar a precisão dos resultados, já que pode envolver fenómenos refrativos aos quais o sistema de medição não está preparado para compensar.

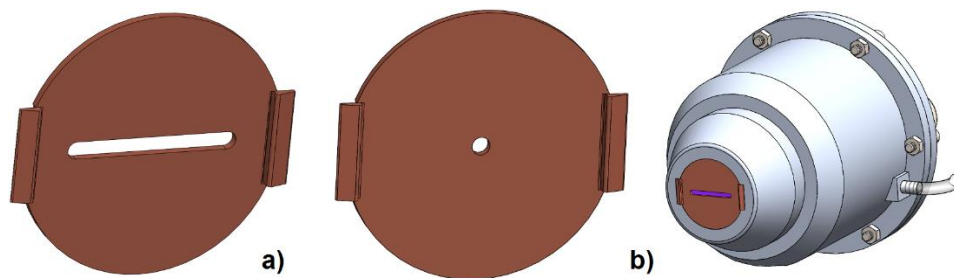


Figura 5.30 – Tampas da componente ótica da PI 450 G7

Relativamente aos processos de fabricos envolvidos na produção da caixa de refrigeração, propõe-se que o oco cilíndrico seja produzido a partir de um tubo posteriormente maquinado, enquanto que o bloco frontal da caixa, que envolve a componente ótica da câmara e os dois furos roscados M4 para a sua fixação, deve ser fabricado por maquinagem, tal como o bloco oco da tampa que envolve as fichas da câmara. Ambas as flanges, tanto a da caixa como a da tampa, devem ser produzidas por maquinagem de chapas de alumínio com abertura de 6 furos roscados M4.

O suporte de fixação do sistema de medição térmico na impressora tridimensional, deverá ter em conta o facto da sua massa ser bastante significativa em relação à da cabeça da impressora 3D (aproximadamente 1kg e 2.5kg respetivamente). Tal sugere que seja de considerar criar um guiamento idêntico ao do eixo XX da cabeça impressora 3D (Figura 5.31) que aloje o suporte da caixa de refrigeração, com vista a não sobrecarregar as guias já existentes no sistema, por fenómenos já mencionados no início da presente secção. Estas novas guias deverão ser dotadas de um sistema de translação por transmissão mecânica de correia-polia, o que torna necessário a aquisição de um novo motor passo-a-passo (idêntico ao visível na figura abaixo) e o respetivo *driver*, para que o sistema de medição consiga acompanhar o movimento de deposição de forma solidária com a cabeça da impressora. Os suportes das novas guias deverão ser apoiadas no guiamento do eixo YY original da impressora, paralelamente às guias XX da cabeça de impressão. Deste modo, o sistema apresentará apenas mais um grau de liberdade face aos já existentes (de 3 para 4 G.D.L.), visto que as guias YY transladam em simultâneo o sistema de medição a instalar e a cabeça de impressora já instalada, sendo que os movimentos verticais de deposição de material são exclusivamente realizados pelas guias ZZ de ascensão do tabuleiro.

A possibilidade de implementar dois guiamentos XX, para além de evitar sobrecargas inerciais nos movimentos de impressão, permite a realização movimentos relativos entre a câmara termográfica e a cabeça da impressora 3D nesse eixo, viabilizando a solução de adicionar a tampa da lente b) (Figura 5.30) na monitorização de ambos os bicos. Este movimento relativo pode ser efetuado por manipulação do *driver* independente do novo guiamento para o suporte da câmara, mas também poderá ser efetuado por movimentação manual do operador, caso o motor esteja destravado quando o sistema se encontre desligado. Contudo, em situações normais de operação o novo *driver* deve-se encontrar sincronizado com

o *driver* do motor passo-a-passo responsável pela translação em XX da cabeça da impressora, de maneira à câmara termográfica acompanhar com precisão o filamento a ser depositado.

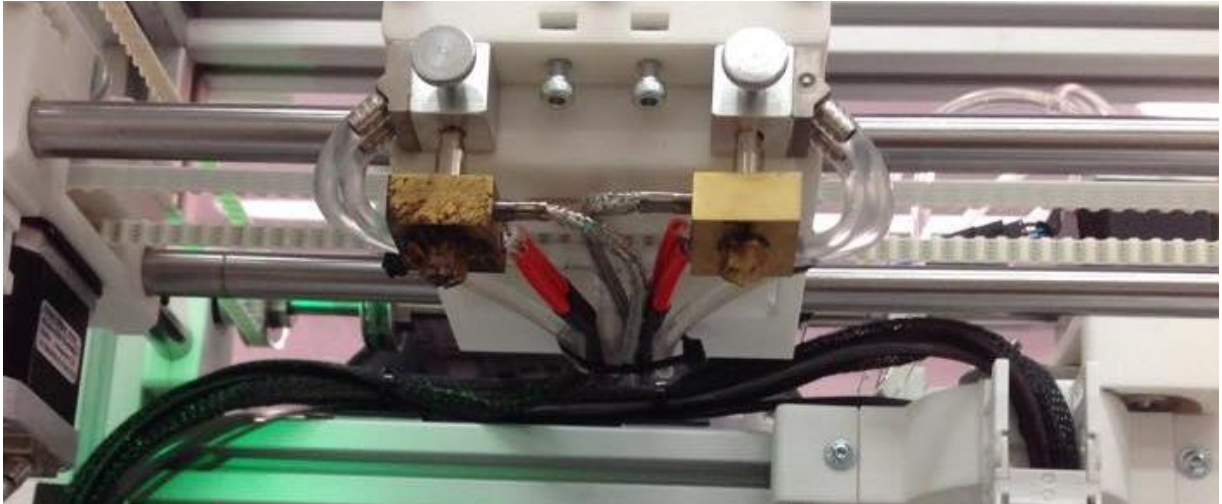


Figura 5.31 – Cabeça da impressora Kühling&Kühling e respetivo sistema de guiamento do eixo XX

5.2.3 Implementação do sistema de controlo

Ao contrário da solução relativa à introdução do pirómetro, nesta segunda solução a hipótese de se optar pela integração direta da monitorização térmica do filamento no sistema no sistema de controlo atual da impressora 3D é de todo inviável. Isto advém facto do controlador interno da impressora não cumprir os requisitos mínimos para análise termográfica, já que embora apresente um acelerador gráfico 3D, apenas tem 512GB DDR3 de memória RAM e um processador de 1GHz, sendo que grande parte da sua capacidade já se encontra alocada aos processos de impressão. Entenda-se que o tratamento das imagens obtidas pela PI 450 G7 requer uma certa capacidade computacional tanto a nível gráfico como de processamento de dados ligados à análise térmica. Evitando a aquisição de um novo controlador de maior capacidade que integre todo o sistema, que traria um elevado investimento e complexidade na reconfiguração quase total do sistema de controlo da impressora, opta-se uma vez mais por uma metodologia de controlo indireto da temperatura do extrusor, implementando um controlador externo em comunicação com o controlador já existente na impressora 3D, que, entre outros parâmetros, dita a potência fornecida ao bloco de aquecimento do polímero a depositar.

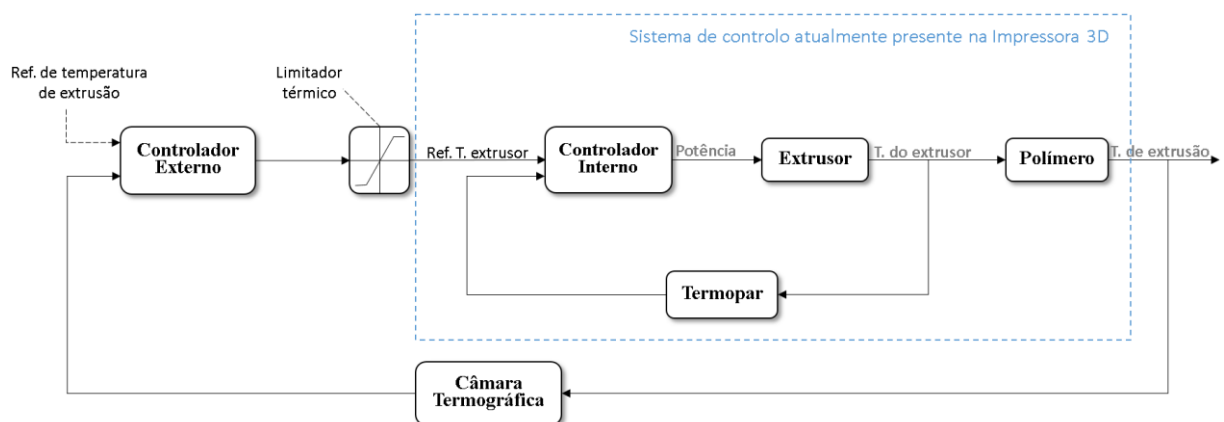


Figura 5.32 - Complementação do sistema de controlo da impressora 3D por integração da câmara termográfica

Na Figura 5.32 apresenta-se o modo como a câmara termográfica e o respetivo controlador da temperatura de extrusão vão integrar o sistema de controlo térmico original da impressora Kühling&Kühling. Resumindo todo o processo à mais simplificada análise, a temperatura de

extrusão do polímero será medida pela câmara termográfica, que dará seguimento a essa informação para o controlador externo, que por sua vez irá através de um algoritmo de controlo determinar a temperatura do extrusor pretendida para compensar os desvios da temperatura de extrusão e, por fim, transmitirá esse valor da temperatura do extrusor ao controlador interno, que induz uma variação de potência ao bloco de aquecimento de acordo com a temperatura solicitada para o extrusor.

O sistema de controlo térmico da presente solução é esquematicamente semelhante à proposta na Figura 5.15, referente à primeira solução, porém, difere significativamente no modo de processamento de dados do instrumento de medição por parte do controlador externo. A Figura 5.33 elucida esta diferenciação num diagrama que expande o controlador interno em duas aplicações fundamentais distintas.



Figura 5.33 – Diagrama da sequência de processos a implementar com a introdução do sistema de medição térmica

No caso do pirómetro existe apenas uma variável a tratar, que é a temperatura do *spot size* medida pelo pirómetro, enquanto que com a câmara termográfica é inevitável um processamento de toda a imagem obtida por esta, não obstante a filtragem de parte dessa informação numa etapa posterior. Posto isto, uma primeira leitura dos dados emitidos pela PI 450 G7 terá que englobar um elevado número de variáveis térmicas, precisamente uma por cada pixel da imagem. A concretização deste processo é possibilitada pelo *software* disponibilizado pelo fabricante denominado *PI Connect*, já referido na secção 5.1.1, que para além da reprodução da informação enviada pela câmara, permite a sua análise através de diversas ferramentas e também a parametrização da própria câmara, relativamente ao fluxo oposto de informação. Em acréscimo às potencialidades mencionadas, o *software* disponibiliza ainda um SDK (Software Development Kit) que engloba um conjunto de soluções para interface com outras aplicações de controlo. Para além de existir a possibilidade já mencionada de envio de sinais via PIF (Process Interface), que envolve a transmissão de um sinal elétrico via saída analógica, o sistema PI da *Optris* apresenta bibliotecas de manipulação de dados em *open-source* que podem ser transmitidos a outros *softwares* por duas alternativas:

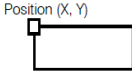




- Comunicação série por portas COM físicas ou virtualmente criadas;
- Sistema de comunicação entre processos - IPC (InterProcess Communication).

Sendo a comunicação série mais vocacionada para aplicações diretas em PLCs, focar-se-á a atenção no modo de interface mais adequado à aplicação, que é o *InterProcess Communication*. Os dados fornecidos pelo IPC encontram-se escritos em linguagem de programação C, C#, C++, CLI ou VBA, estando a informação compilada por *Microsoft Visual Studio* e podendo ser ligada a uma aplicação secundária sob duas diferentes formas:

- Ligação por vínculo dinâmico a partir de bibliotecas DLL (Dynamic-link Library);
- Ligação estática por ficheiros .lib;

A variedade de funções disponibilizadas por IPC permite que uma outra aplicação, como o *LabView*, importe bibliotecas de dados referentes às medições térmicas efetuadas pela PI 450 G7, sendo de interesse neste caso a obtenção em tempo-real da variável temperatura de um só pixel termográfico, referente ao filamento extrudido da impressora 3D. Posto isto, deve ser definida a área de medição térmica no *PI Connect*, escolhendo a geometria apropriada entre as apresentadas na Tabela 5.3, que para o efeito será o ponto de medição de 1x1 pixéis.

Tabela 5.3 – Geometrias disponíveis no PI Connect para áreas de medição da temperatura da imagem termográfica

Geometria da área de medição térmica	
	Retângulo definido pelo utilizador
	Ponto de medição (1x1 pixéis)
	Ponto de medição (3x3 pixéis)
	Ponto de medição (5x5 pixéis)
	Elipse definida pelo utilizador

O *LabView*, ao importar a variável da temperatura de extrusão proveniente do *PI Connect*, deve apresentar todo o processo de controlo necessário para transmitir a informação correta ao controlador interno. Um algoritmo de controlo deve contrapor a temperatura de extrusão medida com uma temperatura de referência introduzida de acordo com o plástico extrudido, calculando uma nova variável referente à temperatura do extrusor, devendo esta corresponder à compensação que o bloco de aquecimento deve realizar para compensar os desvios térmicos de extrusão do plástico, evitando assim a sua possível decomposição. Esta variável referente à temperatura do extrusor deve igualmente ser transmitida em tempo-real ao controlador interno da impressora 3D Kühling&Kühling, que vai ajustar proporcionalmente a potência fornecida ao bloco de aquecimento do filamento a depositar. Já foi referido no presente texto, mas é relevante realçar que na versão original da impressora a introdução da temperatura do extrusor é realizada pelo operador por referência a um valor tabelado para o material a extrudir. Este valor constante será substituído nesta solução por uma variável que vai permitir um controlo térmico do processo mais apertado.

É ainda relevante mencionar outras capacidades do *PI Connect* que podem ser úteis no desenvolvimento do sistema de controlo da temperatura de extrusão, destacando-se:

- Exclusão de zonas quentes/frias: possibilidade de exclusão de certas áreas da imagem, definidas pelo operador, que não sejam de interesse para a aplicação e possam interferir com a medição térmica desejada. No caso da presente solução, poderá ser útil excluir a área termográfica correspondente ao bico da impressora, já que este apresentará temperaturas superiores ao filamento a medir;
- Determinação seletiva da emissividade: possibilidade de distinguir áreas termográficas com diferente emissividade na mesma imagem, o que pode ser útil na análise na impressão multimaterial, com análise simultânea bico primário e secundário;
- Ajuste dos resultados termográficos: possibilidade de melhoria de resultados obtidos pela câmara termográfica, por introdução de valores de temperatura conhecidos em certos pontos da imagem;
- Criação de alarmes: possibilidade de criação de limites superiores ou inferiores de temperatura que caso sejam alcançados acionam um alarme acústico/visual ou desencadeiam um processo de segurança, podendo cumprir a função do limitador pretendido para a solução, parte integrante do sistema de controlo representado na Figura 5.32 [58], [59].

5.3 Avaliação das soluções

Ambas as soluções descritas mostram ser capazes de cumprir os requisitos do problema proposto, podendo-se optar por qualquer uma delas para futura implementação, dependendo do orçamento disponível para o projeto e os recursos disponíveis para a conceção dos produtos envolvidos no desenvolvimento do sistema de medição térmica. Porém, as duas propostas desenvolvidas envolvem diferentes princípios de solução e, como tal, devem ser contrapostas para se concluir sobre qual é a mais indicada para a aplicação pretendida. Com o intuito de clarificar os prós e contras de cada solução, a Tabela 5.4 resume as especificações de cada uma, confrontando-as com um esquema cromático de fácil perceção.

Tabela 5.4 – Comparação das especificações das soluções propostas

Solução	1ª Solução	2ª Solução
Instrumento de medição	Pirómetro	Câmara Termográfica
Modelo	CTfast LT	PI 450 G7
Ponto mínimo de medição	0.5 mm	0.1 mm
Resolução	0.4 °C	0.13 °C
Exatidão	±1 % ou ±2 °C	±2 % ou ±2 °C
Tempo de resposta	2 ms	12 ms
Interface	USB 2.0	USB 2.0
Gama espectral	8 – 14 µm	7.9 µm
Gama térmica de medição	-50 – 975 °C	200 – 1500 °C
Temperatura ambiente	0 – 85 °C	0 – 70 °C
Peso (sensor + suporte)	±0.14 kg	±1 kg
Volume (sensor + suporte)	±38 cm ³	±253 cm ³
Custo do instrumento	530 €	5850 €

Embora a Tabela 5.4 indique qual a solução que apresenta uma melhor especificação para um dado requisito, não é possível concluir qual a solução mais adequada para o projeto num prisma global. Posto isto, recorre-se a uma matriz de avaliação, apresentada na Tabela 5.5, que tem em conta o peso que cada especificação tem no presente trabalho, sendo este avaliado numa escala de 0 a 5, em que 5 corresponde a um requisito fulcral para a concretização do sistema e 0 a um requisito irrelevante para o presente problema. De igual modo, o cumprimento ou não dos requisitos por parte de uma especificação de uma dada solução encontra-se repartido numa escala de 0 a 5 valores, em que cada valor significa:

- 5 – Supera as especificações previstas para cumprir os requisitos
- 4 – Cumpre os requisitos com distinção
- 3 – Cumpre os requisitos mínimos
- 2 – Necessita de uma adaptação do sistema
- 1 – Condiciona o desempenho do sistema
- 0 – Insuficiente

A média dos valores relativos de uma determinada solução ditará se esta é aceitável para integrar o sistema de medição térmica desejado, enquanto que a média dos valores absolutos é uma ferramenta útil para confrontar as duas soluções de uma forma totalitária, tendo em conta o peso de cada especificação, para além do seu valor.

Tabela 5.5 – Matriz de avaliação das soluções propostas

	Peso	Valor			
		1ª Solução		2ª Solução	
	-	Relativo	Absoluto	Relativo	Absoluto
Ponto mínimo de medição	5	1	5	4	20
Resolução	4	5	20	5	20
Exatidão	4	3	12	3	12
Tempo de resposta	3	4	12	4	12
Interface	2	5	10	5	10
Gama espectral	3	4	12	3	9
Gama térmica de medição	5	5	25	5	25
Temperatura ambiente	3	2	6	2	6
Peso (sensor + suporte)	2	4	8	2	4
Volume (sensor + suporte)	2	4	8	3	6
Média	-	4.11	11.8	4	12.8

Da análise da Tabela 5.5, conclui-se em primeira instância que a 2ª solução, relativa à implementação de uma câmara termográfica, é a mais apelativa para o projeto de conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico da impressora 3D em estudo. Contudo, verifica-se por observação da média dos valores relativos que ambas as soluções são viáveis para superar o presente problema, já que de acordo com a escala de avaliação de especificações cumprem todos os requisitos, de uma forma geral, com distinção.

É ainda de maior importância fazer uma análise orçamental do projeto, visto que a solução selecionada para a conceção do sistema de medição vai depender significativamente dos valores previstos para o investimento. A discrepância de custos de aquisição dos instrumentos de medição para as duas soluções é nítida, sendo necessário efetuar um estudo comparativo de custo/desempenho para definir qual o melhor percurso a seguir.

Tendo em consideração que a conceção do sistema de medição de temperatura é primariamente requerida para a impressora tridimensional Kühling&Kühling disponível no INEGI, optar pela 1ª solução, relativa à aplicação do pirómetro, torna-se mais plausível visto que o seu custo é mais ajustado face ao próprio custo da máquina, cumprindo de igual forma todos os requisitos previstos. Porém, sendo esta impressora tridimensional um instrumento de investigação para o centro de inovação que é o INEGI, a realização deste aprimoramento do sistema pode ser vista exclusivamente como um projeto de estudo para futura execução de um produto final de uma impressora FDM que integre o sistema de medição de temperatura de extrusão abordado, produto este que deve apresentar a capacidade de fabricar peças constituídas por plásticos de elevado desempenho e, por conseguinte, de elevada qualidade, para aplicação direta na indústria aeroespacial. Analisando o assunto por este prisma, um elevado investimento pode desencadear um elevado retorno, pelo que a aplicação da câmara termográfica PI 450 G7 trará um conjunto de mais valias que o pirómetro não possibilita, o que leva a concluir que a 2ª solução apresenta mais potencialidades para a evolução de um projeto a longo prazo.

6 Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

6.1 Conclusões finais

É possível concluir que os objetivos fulcrais para a presente dissertação foram cumpridos de forma total. As soluções propostas cumprem todas as especificações requeridas para a concretização do sistema de medição térmico não-invasivo solicitado, podendo-se considerar, após uma pesquisa intensiva do estado da arte, que os instrumentos de medição selecionados cumprem de forma impar os requisitos de implementação na impressora tridimensional Kühling&Kühling, naturalmente definidos pelas condicionantes da máquina.

Ambas as soluções suplantaram as dificuldades associadas às imposições geométricas e térmicas de instalação do sistema sem comprometer os requisitos de desempenho, embora necessitando de uma adaptação do sistema original. A primeira solução apresentada relevou a necessidade de modificar o bico da impressora 3D para possibilitar a redução de distância entre o pirómetro e o filamento extrudido de modo a obter a resolução requerida para medir corretamente a sua temperatura, com auxílio de uma lente de *close focus*. Para além da criação de um novo bico, surgiu a necessidade de criar uma geometria de suporte e fixação do pirómetro à cabeça da impressora com capacidade de refrigeração do instrumento, usufruindo do sistema de refrigeração a água já presente na máquina em estudo. Relativamente à 2ª solução, a necessidade de criação de uma caixa de refrigeração para a câmara termográfica e o conseqüente aumento de massa do sistema de medição requerem uma fixação à máquina bastante mais complexa que no primeiro caso, já que não é plausível acoplar o instrumento à cabeça de impressão. Como é imperativo que o sistema de medição térmico acompanhe o movimento de deposição do plástico, foi proposta a conceção de um novo sistema de guiamento para a câmara termográfica que vai originar mudanças profundas na estrutura e no controlo de movimento da impressora 3D.

Constatou-se que as interfaces disponibilizadas pelos instrumentos selecionados permitem uma adaptação flexível em soluções de automação, nomeadamente em ambientes industriais, tornando a futura implementação computacional no sistema de controlo do objeto de estudo bastante facilitada. O estudo realizado na área dos sistemas de aquisição de dados e controlo revelou que o recurso a um *software* como o *LabView* permite a monitorização da temperatura de extrusão e o seu controlo, operando num controlador independente responsável pelo processamento de dados provenientes do instrumento de medição da temperatura de extrusão, com posterior transmissão de valores calculados relativos à temperatura do extrusor, outrora introduzidos pelo operador como uma constante. O recetor destes dados, o controlador interno da impressora 3D, não necessita de qualquer alteração do seu modo de funcionamento, já que a sua função original relativamente à fusão do polímero é, e continuará a ser, assumir um valor de referência para a temperatura do extrusor e desencadear o algoritmo de controlo que determina a potência a fornecer ao bloco de aquecimento do extrusor para atingir essa temperatura.

6.2 Trabalhos futuros

Após seleção da solução mais indicada ao projeto, simplificada pela avaliação facultada no presente documento, será necessário concretizar os suportes do instrumento e, na eventualidade de se optar pela 2ª solução, a caixa de refrigeração, através de um projeto de construção mecânica baseado nas geometrias propostas. Seguidamente deve ser realizada a instalação do sistema de medição térmica na impressora 3D e respetiva calibração, em conjunto com os devidos testes de desempenho tanto com a extrusão de polímeros já admitidos atualmente, como com plásticos de elevado desempenho apenas permitidos pelo aprimoramento tecnológico desenvolvido.

Tendo em conta que atualmente a informação relativa às temperaturas envolvidas na impressão de plásticos volta-se para a temperatura do extrusor da impressora 3D, será expectável que a temperatura de extrusão do plástico varie consoante a impressora, é ainda do interesse do presente trabalho a criação de uma tabela de referência “universal” da temperatura de extrusão dos diferentes plásticos aplicáveis em processos de fabrico aditivo, para consulta indiferenciada por parte de operadores de diferentes impressoras tridimensionais. De notar que a obtenção destes valores pode facilmente ser conseguida com recurso ao sistema desenvolvido no presente trabalho de desenvolvimento, usufruindo das potencialidades do instrumento de medição de temperatura não-invasivo e da sua versatilidade para diferentes materiais.

Perspetivando o sucesso da implementação do sistema de medição, tem-se como objetivo último aplicar esta tecnologia de controlo da temperatura de extrusão dos plásticos numa impressora 3D de gama superior, de forma a atingir a produção de produtos finais de elevada qualidade para comercialização na indústria automóvel e aeroespacial.

7 Referências

- [1] C. Stelter, J. Gardner, G. Sauti, J.-W. Kim e E. Siochi, “Alternate Methods of Part Temperature Control for Warp-free Filament Deposition Additive Manufacturing,” em *RAPID Conference*, Orlando, Flórida, 2016.
- [2] “Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial,” INEGI, 2011. [Online]. Available: <http://www.inegi.up.pt/>. [Acedido em Maio 2016].
- [3] INEGI, “Relatório de atividades e contas - Annual Report 2015,” 2015. [Online]. Available: http://www.inegi.up.pt/ddownloads/relcontas/pdf/RAC_INEGI_2015.pdf. [Acedido em Junho 2016].
- [4] C. Moreau, “The State of 3D Printing,” *Sculpteo*, 2015.
- [5] I. Gibson, D. Rosen e B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2015.
- [6] B. E. Stucker e G. D. J. Ram, “Layer-Based Additive Manufacturing Technologies,” em *Materials Processing Handbook*, CRC Press, 2007.
- [7] Solidscape Inc., Stratasys, 2016. [Online]. Available: www.solid-scape.com/. [Acedido em Março 2016].
- [8] *HT500 FDM 3D Printer Manual*, Kühling&Kühling, 2015.
- [9] “MatWeb-Material Property Data,” 2016. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/>. [Acedido em Março 2016].
- [10] E. Jakab, M. Uddin, T. Bashkar e Y. Sakata, “Thermal decomposition of flame-retarded high-impact polystyrene,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 68, pp. 83-99, 2003.
- [11] C. L. Beyler e M. M. Hirschler, “Thermal Decomposition of Polymers,” em *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2*, National Fire Protection Association, 2002.
- [12] J. Pu-you, B. Cai-ying, H. Li-hong e Z. Yong-hong, “Properties of Poly(vinyl alcohol) Plasticized by Glycerin,” *Journal of forest products & industries*, vol. 3, nº 3, pp. 151-153, 2014.
- [13] M.-H. Yang e Y.-H. Lin, “Measurement and Simulation of Thermal Stability of Poly(Lactic Acid) by Thermogravimetric,” *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 37, nº 4, p. 102271, 2009.
- [14] J. Bandyopadhyay, . S. . S. Ray e M. Bousmina, “Thermal and thermo-mechanical properties of poly(ethylene terephthalate) nanocomposites,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 13, nº 4, pp. 614-623, 2007.

- [15] W. J. Sichina, “Characterization of Polymers Using TGA”.*Thermal Analysis*.
- [16] L. Zolder e N. Sella, “Prototipagem de precisão - O papel dos moldes de impressão 3D na indústria dos moldes de injeção,” Stratasys, 2914.
- [17] Stratasys Ltd., 2016. [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/>. [Acedido em Março 2016].
- [18] A. A. Chan, V. L. Tsang, D. R. Albercht e S. N. Bhatia, “3-D Fabrication Technology for Tissue Technology,” em *BioMEMS and Biomedical Nanotechnology*, Springer, 2007.
- [19] C. Carpenter, “Additive Manufacturing for the Space Industry,” em *Additive Manufacturing*, CRC Press, 2016.
- [20] M. Karen et al., “Solid Freeform Fabrication: An enabling technology for future space missions,” em *Proceedings of the Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing*, San Antonio, Texas, USA, 2002.
- [21] A. Bowyer, “RepRap Project,” 2005. [Online]. Available: <http://www.reprap.org/>. [Acedido em Fevereiro 2016].
- [22] S. Kühling, “Github - KuehlingKuehling Slic3r profile,” 2016. [Online]. Available: <https://github.com/kuehlingkuehling/>. [Acedido em Fevereiro 2016].
- [23] S. D. P. Inc., “High-performance Plastics for Aviation and Aerospace,” 2016. [Online]. Available: <http://www.sdplastics.com/>. [Acedido em Fevereiro 2016].
- [24] A. Bagsik, V. Schöppner e E. Klemp, “FDM Part Quality Manufactured with Ultem*9085,” *Polymeric Materials 2010*, 2010.
- [25] “eFunda,” eFunda Inc., 2016. [Online]. Available: <http://www.efunda.com/>. [Acedido em Março 2016].
- [26] “Modern Plastics,” [Online]. Available: <http://www.modernplastics.com/blog/tecamax-srp/>. [Acedido em Março 2016].
- [27] S. Banerjee, K. K. Kar, M. Ghorai e S. Das, “Synthesis of poly ether ether ketone membrane with pendent phosphonic acid group and determination of proton conductivity and thermal stability,” *High Performance Polymers*, vol. 26, nº 7, 2014.
- [28] H. Farong, W. Xueqiu e L. Shjin, “The thermal stability of polyetherimide,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 18, nº 3, pp. 247-259, 1987.
- [29] B. Gornicka e L. Gorecki, “TGA/DTG/DSC investigation of thermal ageing effects in polyamide-imide enamel,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 101, nº 2, pp. 647-650, 2010.
- [30] J. A. Foreman, C. J. Lundgren e P. S. Gill, “Measurement of the Physical Properties of Engineering Thermoplastics Using Thermal Analysis”.*Thermal Analysis & Rheology*.
- [31] R. P. J. Day, “BeagleBone Black Sytem Reference Manual,” BeagleBone, 2013.
- [32] Optris GmbH, “Infrared Basics,” 2011. [Online]. Available: <http://www.optris.com/>. [Acedido em Fevereiro 2016].
- [33] T. L. Williams, *Thermal Imaging Cameras*, CRC Press, 2009.

- [34] A. Rogalski, *Infrared Detectors*, CRC Press, 2010.
- [35] R. R. Dills, “High-temperature optical fiber thermometer,” *Journal of Applied Physics*, vol. 54, nº 3, pp. 1198 - 1201, 1983.
- [36] A. Bendada, F. Erchiqui e A. Kipping, “Understanding heat transfer mechanisms during the cooling phase of blow molding using infrared thermography,” *NDT & E Internacional*, vol. 38, nº 6, p. 433–441, 2005.
- [37] R. R. Corwin e A. Rodenburgh, “Temperature error in radiation thermometry caused by emissivity and reflectance measurement error,” *Applied Optics*, vol. 33, nº 10, 1994.
- [38] L. Court, “Infrared Thermometer Handbook,” LumaSense Inc., 2011. [Online]. Available: <https://www.lumasenseinc.com/>. [Acedido em Fevereiro 2016].
- [39] H. Zhang, T. L. Hu e J. C. Zhang, “Surface emissivity of fabric in the 8–14 μ m waveband,” *The Journal of The Textile Institute*, vol. 100, nº 1, 2009.
- [40] H. A. C. Eaton, “Infrared imaging bolometers,” *ISSI Scientific Report Series*, vol. 9, nº 1, pp. 515-524, 2013.
- [41] Lumasense Technologies, “Pyrometer Calibration Geometry Rules according to,” 2013. [Online]. Available: http://www.lumasenseinc.com/uploads/Solutions/pdf/Technical_Literature/English/Calibration-Geometry.pdf. [Acedido em Março 2016].
- [42] *Temperature Measurement in Industry - Radiation Thermometry*, VDI/VDE Guideline 3511, 2011.
- [43] P. R. N. Childs, *Practical Temperature Measurement*, Elsevier, 2001.
- [44] L. Court, “Understanding Two-Color (Ratio) Pyrometer Accuracy,” LumaSense Inc., 2011. [Online]. [Acedido em Fevereiro 2016].
- [45] C. Trouilleau et al., “High-performance uncooled amorphous silicon TEC less XGA IRFPA with 17 μ m pixel-pitch,” em *Infrared technologies and applications XXXV*, Proc. SPIE, 2009.
- [46] E. Metcalfe, *Atomic Absorption and Emission Spectroscopy*, Wiley, 1987.
- [47] H. Uchiyama, M. Nakajima e S. Yuta, *Measurement of flame temperature distribution by IR emission computed tomography*, Applied Optics, 1985.
- [48] D. J. Carlson, “Static temperature measurements in hot gas particle flows,” em *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, Rheinhold, 1962.
- [49] T. J. Anderson, G. M. Dobbs e A. C. Eckbreth, *Mobile CARS instrument for combustion and plasma diagnostics*, Applied Optics, 1986.
- [50] G. C. Herring, W. L. Roberts, M. S. Brown e P. A. DeBarber, *Temperature measurement by degenerate four wave mixing with strong absorption of the excitation beams*, Applied Optics, 1996.
- [51] B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Wiley, 1990.
- [52] M. J. Ballico, *Handbook of Temperature Measurement*, Springer, 1998.

- [53] IRCON, “Plastic Film Measurement,” 2006. [Online]. Available: http://support.fluke.com/ircon-sales/Download/Asset/3310192_6127_ENG_C_W.PDF.
- [54] Optris GmbH, “Optris CT Operators Manual,” 2013. [Online]. Available: <http://www.optris.com/downloads-compact-series>. [Acedido em Março 2016].
- [55] Optris GmbH, “Datasheet Optris PI 450 G7,” [Online]. Available: <http://www.optris.com/thermal-imager-optris-pi-450-g7>. [Acedido em Abril 2016].
- [56] Optris GmbH, “Optris,” 2008. [Online]. Available: <http://www.optris.com/optics-calculator>. [Acedido em Abril 2016].
- [57] Optris GmbH, “Optris PI Operator's Manual,” 2016. [Online]. Available: <http://www.optris.com/downloads-infrared-cameras>. [Acedido em Abril 2016].
- [58] Optris GmbH, “Optris PI Connect Operators Manual,” 2012. [Online]. Available: <http://www.varmekamera.se/Manualer/PICConnect-MA-E2012-08-A.pdf>. [Acedido em Maio 2016].
- [59] Optris GmbH, “Interprocess communication (IPC) - Version 2,” 2015. [Online]. [Acedido em Maio 2016].

8 Bibliografia

- L. A. M. Dabague, “O Processo de Inovação no Segmento de Impressoras 3D,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- J. S. Batchelder, H. W. Curtis e D. S. Goodman, “Model generation system having closed-loop extrusion nozzle positioning”. Patente US5303141 A, 12 Abril 1994.
- D. Y. Svet, “The Method of Two-Colour Pyrometry of True Temperature with Unknown Emissivity,” em *AIP Conference Proceedings*, Chicago, Illinois (EUA), 2003.
- J. R. Araujo, J. J. Rodriguez-Andina, J. Farina e M. A. Montealegre, “FPGA-based laser cladding system with increased robustness to optical defects,” em *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, 2012.
- J. R. Araújo e J. J. Rodriguez-Andina, “ROS-based 3D on-line monitoring of LMD robotized cells,” em *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Cambridge, 2015.
- “A new infrared pyrometer for polymer temperature measurement during extrusion moulding,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 46, nº 1-2, pp. 11-15, 2004.
- C. Abeykoon, P. J. Martin, A. L. Kelly e E. C. Brown, “A review and evaluation of melt temperature sensors for polymer extrusion,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 182, p. 16–27, 2012.
- G. Tapia e A. Elwany, “A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, nº 6, p. 060801, 2014.
- D. Hu, H. Mei, G. Tao e R. Kovacevic, “Closed Loop Control of 3D Laser Cladding Based on Infrared Sensing,” *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, pp. 129-137, 2001.
- B. Müller e U. Renz, “Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 72, nº 8, pp. 3366-3374, 2001.
- T. Ueda, M. Sato, A. Hosokawa e M. Ozawa, “Development of infrared radiation pyrometer with optical fibers,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, nº 1, p. 69–72, 2008.
- A. Gottwald e U. Scheler, “Extrusion Monitoring of Polymer Melts Using a High-Temperature Surface-NMR Probe,” *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 290, nº 5, pp. 438-442, 2005.
- T. Fu, P. Tan, C. Pang e Y. Shen, “Fast fiber-optic multi-wavelength pyrometer,” *The Review of scientific instruments*, vol. 86, nº 6, p. 064902, 2011.

- C. Dourmanidis e Y.-M. Kwak, “Geometry Modeling and Control by Infrared and Laser Sensing in Thermal Manufacturing with Material Deposition,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 123, nº 1, pp. 45-52, 2000.
- J. R. Araujo, J. J.-. Rodriguez-Andina, J. Farina, F. Vidal, J. L. Matos e M. Á. Montealegre, “Industrial Laser Cladding Systems- FPGA-Based Adaptive Control,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, nº 4, pp. 35 - 46, 2012.
- C. J. Gerritsma e J. H. Haanstra, “Infrared Transmission of Air Under Laboratory,” *Infrared Physics*, vol. 10, nº 2, pp. 79-90, 1970.
- M. Doubenskaia, M. Pavlov e Y. Chivel, “Optical System for On-Line Monitoring and Temperature Control in Selective Laser Melting Technology,” *Key Engineering Materials*, vol. 437, pp. 458-461, 2010.
- N. Haji e J. E. Spruiell, “Radiation Pyrometry on Semitransparent Sheets,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 34, nº 2, pp. 116-121, 1994.
- D. Hu e R. Kovacevic, “Sensing, modeling and control for laser-based additive,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, nº 1, p. 51–60, 2003.
- A. J. Bur, S. C. Roth, M. A. Spalding, D. W. Baugh, K. A. Koppi e W. C. Buzanowski, “Temperature gradients in the channels of a single-screw extrusion,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 44, nº 11, p. 2148–2157, 2004.
- T. Fu, J. Liu, J. Tang e C. Shi, “Temperature measurements of high-temperature semi-transparent infrared material using multi-wavelength pyrometry,” *Infrared Physics & Technology 66*, vol. 66, pp. 49-55, Setembro 2014.
- T. Ueda, K. Yamada e K. Nakayama, “Temperature of Work Materials Irradiated with CO2 Laser,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 46, nº 1, pp. 117-122, 1997.