



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Marco Ruben Laranjeira Santos Rodrigues

HMI para Fabrico Aditivo

Mestrado em Engenharia de Software

Dissertação efetuada sob a orientação de

Professor Doutor Pedro Miguel Moreira

Mestre Engenheiro João Paulo Pereira

Julho de 2017

RESUMO

As Tecnologias de Informação e Comunicação são, nos dias que correm, uma área com uma presença e importância cada vez maior nos vários setores da indústria. Com as indústrias há procura de otimizar recursos, diminuir custos e aumentar produtividade, a convergência com produtos de TIC tem sido cada vez mais natural.

Devido à natureza particular do processo de Fabrico Aditivo, também conhecido como impressão a três dimensões e cuja finalidade é produzir um objeto sólido em três dimensões proveniente de uma representação digital, foi identificada uma clara necessidade na atualidade da indústria relativa à interface entre o processo e o operador. Como tal, este projeto visa desenvolver uma Human-Machine Interface especificamente adaptada para um equipamento de Fabrico Aditivo.

Após uma fase de investigação e pesquisa sobre trabalhos relacionados, foi proposta e testada uma solução através do desenvolvimento de um protótipo, que validou a arquitetura pensada sob o ponto de vista tecnológico.

No que diz respeito à solução final, numa primeira fase foi feito um levantamento de requisitos em conjunto com um grupo de utilizadores, que culminou com uma maquete funcional e que por sua vez foi validada pelos mesmos recorrendo a metodologias de avaliação de usabilidade que originaram resultados satisfatórios. Na fase seguinte foi desenvolvida a HMI e testada num equipamento real de Fabrico Aditivo, onde foi possível realizar a impressão de uma peça e explorar todas as capacidades e mais-valias que a camada de software desenvolvida acrescentou à solução de automação dentro do respetivo contexto. A solução desenvolvida foi ambiciosa e trouxe inovação, pois não foi encontrada nenhuma outra que ao mesmo tempo explorasse as potencialidades das tecnologias web e fosse também customizada ao processo de Fabrico Aditivo, e como tal, poderá servir de inspiração para trabalhos futuros relacionados. Alguns dos objetivos definidos para o projeto ficaram por atingir, sendo assim arrastados para trabalho futuro juntamente com a exploração de algumas tecnologias emergentes.

ABSTRACT

Information and Communication Technologies are, nowadays, a field with a huge and very important presence in several industry sectors.

With the industry always seeking resource optimization, costs decreasing and productivity increasing, the convergence with ICT products has been becoming more natural.

This project aims to develop a Human-Machine Interface specifically adapted to an Additive Manufacturing equipment. Additive Manufacturing is also known as 3d printing, and its purpose is to create solid objects in three dimensions starting from a digital representation.

This report presents the first stage of the project where an introduction about the most important subjects and related work is presented, namely relevant topics regarding the automation, software development and additive manufacturing process itself. It is also presented a study about some existent approaches concerning the integration of software development in automation projects. This convergence results in innovative solutions and an increased product value.

Finally, a development proposal is discussed for the next stage of the project and a functional prototype that is already developed is presented. This prototype validates the design and used technologies.

May 2017

CONTEÚDO

1. Introdução	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 Problema	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Estrutura do Documento.....	5
2. Estado da Arte	6
2.1 Introdução	6
2.2 Automação	6
2.2.1 História.....	7
2.2.2 Objetivos.....	8
2.2.3 Componentes	9
2.2.4 Software para Automação.....	11
2.3 Indústria 4.0	15
2.4 Tecnologias de Suporte	17
2.4.1 Redes e Internet	17
2.4.2 Tecnologias Web	19
2.4.3 Cloud Computing	23
2.4.4 Human-Machine Interfaces	26
2.4.5 Realidade Aumentada	28
2.4.6 Sistemas Scada	29
2.5 Fabrico Aditivo	32
2.6 Trabalho Relacionado.....	35
2.6.1 Controlo e Automação na Indústria	35
2.6.2 Sistemas Web-Based para Controlo e Automação	38
2.6.3 Realidade Aumentada na Indústria	47
3. Desenvolvimento de Proposta de Solução.....	51

3.1 Introdução	51
3.2 Descrição dos Equipamentos	51
3.2 Sub-Objetivos.....	56
3.3 Arquitetura do Protótipo.....	58
3.4 Protótipo Funcional	59
3.4 Conclusões	62
4. Desenvolvimento e Validação da Solução Final.....	63
4.1 Introdução	63
4.2 Análise de Requisitos e Desenvolvimento de Maquete	63
4.2 Arquitetura Final.....	71
4.3 Avaliação da Interface	73
4.4 Sistema Desenvolvido.....	78
4.5 Resultados Obtidos.....	90
5. Conclusões e Trabalho Futuro	100
Referências.....	102
Anexos.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - HMI PARA FABRICO ADITIVO	3
FIGURA 2 - EXEMPLO DE UM PLC.	9
FIGURA 3 - SENSORES DE PROXIMIDADE.	10
FIGURA 4 - DRIVES INDUSTRIAIS.....	11
FIGURA 5 - AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO TWINCAT 3.	12
FIGURA 6 - AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO SIMATIC STEP 7.	13
FIGURA 7 - AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO PL7.....	14
FIGURA 8 - INDÚSTRIA 4.0	15
FIGURA 9 – ILUSTRAÇÃO DO CONCEITO DE FÁBRICA INTELIGENTE	16
FIGURA 10 - EVOLUÇÃO DA ARPANET.....	18
FIGURA 11 - ARQUITETURA DO PROTOCOLO HTTP	19
FIGURA 12 – LADO CLIENTE DA WEB.....	21
FIGURA 13 - ARQUITETURA BASE DE APLICAÇÕES WEB.....	22
FIGURA 15 - ARQUITETURA CLOUD COMPUTING	24
FIGURA 16 - HUMAN-MACHINE INTERFACE.....	26
FIGURA 17 – ARQUITETURA DE UM SISTEMA SCADA	30
FIGURA 18 – ILUSTRAÇÃO DE SISTEMA DE FABRICO ADITIVO.	32
FIGURA 19 - GANHOS DE TEMPO.	36
FIGURA 20 - LINHA DE PALETIZAÇÃO AUTOMATIZADA.....	37
FIGURA 21 – ARQUITETURA PARA MONITORAÇÃO REMOTA DOS PROCESSOS.	39
FIGURA 22 - PÁGINA WEB DINÂMICA PARA MONITORAÇÃO.	40
FIGURA 23 - APLICAÇÃO JAVA PARA MONITORIZAR TEMPERATURA.	41

FIGURA 24 - ARQUITETURA DO SISTEMA PARA CONTROLO REMOTO DE LABORATÓRIO	42
FIGURA 25 - PÁGINA NO BROWSER PARA CONTROLO REMOTO.....	43
FIGURA 26 - ARQUITETURA DO SISTEMA PARA CONTROLO DE PLC REMOTAMENTE.....	44
FIGURA 27 - PÁGINA WEB PARA CONTROLO DAS VARIÁVEIS DO PLC.....	44
FIGURA 28 - SOFTWARE EIGER.....	45
FIGURA 29 - A INTERFACE DO SISTEMA ATRAVÉS DOS ÓCULOS E DOS MARCADORES DE RA.....	48
FIGURA 30 - UMA PEÇA A SER MODELADA. MATERIAL VIRTUAL É "DESPEJADO" DO SPRAY NA MÃO DIREITA..	48
FIGURA 31 - À ESQUERDA A PEÇA EM RA, AO CENTRO A PEÇA EM SOFTWARE DE MODELAÇÃO 3D E À DIREITA A PEÇA IMPRESSA.....	49
FIGURA 32 - MONTAGEM DE PRODUTO ANIMADA EM AMBIENTE DE RA.....	50
FIGURA 33 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O PROTÓTIPO FUNCIONAL.....	52
FIGURA 34 - EQUIPAMENTO EM FUNCIONAMENTO	52
FIGURA 35 - EQUIPAMENTO A DEPOSITAR GESSO, CRIANDO UMA PEÇA.....	53
FIGURA 36 - ESTRUTURA DA ÁREA DE IMPRESSÃO DO EQUIPAMENTO FINAL	54
FIGURA 37 - EQUIPAMENTO DE FABRICO ADITIVO E A HMI.....	54
FIGURA 38 - EQUIPAMENTO DE FABRICO ADITIVO E A HMI.....	55
FIGURA 39 - EXEMPLO DE CÓDIGO G.....	56
FIGURA 40 - ARQUITETURA DO PROTÓTIPO	58
FIGURA 41 - SISTEMA COM O EQUIPAMENTO LIGADO E EM ESTADO ON	60
FIGURA 42 - SISTEMA A EXECUTAR O GCODE NA TABELA VERMELHA.....	60
FIGURA 43 - VISUALIZAÇÃO DA PEÇA A SER IMPRESSA EM 3D (CIMA) E 2D (BAIXO)	61
FIGURA 44 - LEVANTAMENTO DE REQUISITOS (1 ^a PARTE).....	64
FIGURA 45 - LEVANTAMENTO DE REQUISITOS (2 ^a PARTE).....	65
FIGURA 46 - MAQUETE DA MÁQUINA LIGADA E TABS AUTOMÁTICO E AQUECIMENTO VISÍVEIS.....	66
FIGURA 47 - MAQUETE DA MÁQUINA EM PAUSA E TABS MANUAL E INSUFLAÇÃO DE AR VISÍVEIS	67

FIGURA 48 - MAQUETE DA MÁQUINA DESLIGADA E TABS MDI E PARÂMETROS VISÍVEIS	68
FIGURA 49 - PROTÓTIPO INTERATIVO EM MODO AUTOMÁTICO	69
FIGURA 50 - PROTÓTIPO INTERATIVO EM MODO MANUAL	69
FIGURA 51 - PROTÓTIPO INTERATIVO EM MODO MDI	70
FIGURA 52 - ARQUITETURA DA SOLUÇÃO FINAL.....	71
FIGURA 53 - PROBLEMAS DE USABILIDADE VS NÚMERO DE UTILIZADORES.....	74
FIGURA 54 - ESQUEMA DE EIXOS DO EQUIPAMENTO.....	79
FIGURA 55 - ECRÃ INICIAL.....	80
FIGURA 56 - EIXOS B E C	81
FIGURA 57 - EIXOS B E C	81
FIGURA 58 - VISUALIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS NA HMI.....	81
FIGURA 59 - VISUALIZAÇÃO DO OBJETO EM 3D	82
FIGURA 60 - VISUALIZAÇÃO DO OBJETO EM 3D	83
FIGURA 61 - MODO DE OPERAÇÃO AUTOMÁTICO.....	83
FIGURA 62 - MODO DE OPERAÇÃO MANUAL.....	84
FIGURA 63 - MODO DE OPERAÇÃO MDI.....	85
FIGURA 64 - TECLADO VIRTUAL PARA INSERÇÃO DE LINHA NO MODO MDI.....	85
FIGURA 65 - AJUSTE DE MESA E ILUMINAÇÃO DA CÂMARA.....	86
FIGURA 66 - DESLIGAR PARTES DO EQUIPAMENTO	87
FIGURA 67 - HMI: TABELA DE EXECUÇÕES	88
FIGURA 68 - HMI: TEMPERATURAS DE UMA EXECUÇÃO	89
FIGURA 69 - REQUISITOS IMPLEMENTADOS NA HMI.....	91
FIGURA 70 - REQUISITOS IMPLEMENTADOS NA HMI.....	92
FIGURA 71 - IMAGEM 3D DA PEÇA GERADA NO SOFTWARE GERADOR DE CÓDIGO G (HTTP://SLIC3R.ORG)	93
FIGURA 72 - HMI A MONITORIZAR IMPRESSÃO DA PEÇA	94

FIGURA 73 - PRIMEIRAS CAMADAS DA PEÇA.....	94
FIGURA 74 - PEÇA FINALIZADA.....	95
FIGURA 75 - PEÇA FINALIZADA E AINDA NO TABULEIRO DE IMPRESSÃO.....	96
FIGURA 76 - PEÇA FINALIZADA E IMPRESSA ATRAVÉS DA HMI	96
FIGURA 77 - EXECUÇÃO DO FICHEIRO "BOX.NC" REGISTADA NA BASE DE DADOS	97
FIGURA 78 - TEMPERATURAS REGISTADAS E GRÁFICO PRODUZIDO COM AS MESMAS	98

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DOS ARTIGOS E CASOS DESCritos.....	46
TABELA 2 - AVALIAÇÃO COM SUS (SYSTEM USABILITY SCALE).....	75
TABELA 3 - SUGESTÕES DE MELHORIA DOS UTILIZADORES	76
TABELA 4 - AVALIAÇÃO SUS APÓS TESTE.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS

HMI	Human-Machine Interface (interface homem-máquina)
PAC	Programmable Automation Controller (controlador programável de automação)
PLC	Programmable Logical Controller (controlador lógico programável)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Controlo Supervisório e Aquisição de Dados)
OPC	OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control
CSS	Cascade Stylesheet
CNC	Controlo Numérico Computorizado (Computer Numerical Control)
NC	Controlo Numérico (Numerical Control)
ADS	Automation Device Specification
RA	Realidade Aumentada
TI	Tecnologias de Informação
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Com o rápido crescimento tecnológico ao longo dos últimos anos a integração de novas tendências tecnológicas tornou-se natural em qualquer área ou setor que beneficie das mesmas. Tecnologias emergentes como realidade aumentada, realidade virtual, entre outras, tendem a ser exploradas e embebidas nas mais variadas aplicações em diversos setores da indústria. Estes facilmente encontram a motivação certa para cada vez mais apostar em soluções de alta tecnologia dado que os ganhos são imensos e a não apostar pode resultar numa falta de inovação e consequentemente no não acompanhamento do trilho da evolução. As HMIs (*Human-Machine Interface*) para controlo de processos de fabrico não são diferentes de outras áreas e podem beneficiar muito da integração de variadas tecnologias (como as supramencionadas).

Numa perspetiva histórica de evolução das HMIs, é importante referenciar que por volta de 1945 apareceu a primeira interface homem-computador que ficou conhecida como a era da *Batch Interface*, numa fase em que o poder computacional era escasso e caro, as interfaces eram rudimentares e os utilizadores tinham que se acomodar aos computadores e nunca o contrário. As tecnologias evoluíram, passando por vários processos e transformações, levando a que as interfaces passassem também elas por várias fases como a era da linha de comandos e culminando na era das interfaces gráficas como as que conhecemos e utilizamos hoje em dia.

As HMIs são, nos dias que correm, utilizadas para os mais variados fins, como por exemplo nos automóveis para fornecerem informação ao condutor acerca da viagem, de parâmetros do automóvel, de extras como o ar condicionado ou o rádio, em equipamento médico para fornecer informação acerca do paciente ou do processo/exame para o qual o equipamento foi construído e para permitir alguma ação mediante o estado do paciente, na indústria para fornecer informação sobre um processo de fabrico e para permitir controlo sobre o mesmo.

O trabalho aqui descrito surge no âmbito de um outro projeto de investigação a decorrer no INEGI que visa explorar tecnologias emergentes de fabrico aditivo e a sua aplicação para além do estado da arte em termoplásticos para aplicações de alta temperatura e resistência.

O INEGI é um instituto de investigação de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, e tem, nos últimos anos, participado e consolidado a sua posição como parceiro da indústria nacional e internacional pela larga experiência e reconhecimento em diversas áreas de

interesse, entre elas o desenvolvimento de produto, a engenharia industrial e a gestão de projetos de I&I, apresentando uma larga experiência e reconhecimento a nível nacional e internacional em áreas relevantes para o presente projeto como o desenvolvimento de produto, Fabrico Aditivo, Indústria 4.0, engenharia industrial e a gestão de projetos de I&I.

Assim, este trabalho visou desenvolver uma HMI *web-based* customizada para um equipamento de fabrico aditivo. A HMI deve permitir monitorização e manipulação dos seus parâmetros munindo o operador de uma ferramenta capaz de fornecer atempadamente toda a informação relativa ao processo de fabrico, assim como ao equipamento em si, e deve permitir o controlo do mesmo através de funções para o efeito. Para atingir os objetivos é expectável que sejam exploradas tecnologias de desenvolvimento web, assim como a possibilidade de integrar tecnologias emergentes e que acrescentem valor, como por exemplo realidade aumentada, realidade virtual, entre outras.

1.2 PROBLEMA

Dada a contextualização e motivação do projeto, facilmente conseguimos identificar uma clara necessidade que deve ser suprida com o desenvolvimento do mesmo.

No contexto industrial já existem HMIs para controlo de equipamentos há vários anos, no entanto, diferentes processos de fabrico têm diferentes necessidades do ponto de vista do controlo e automação. O trabalho aqui reportado surge no âmbito de um projeto inovador que visa investigar sobre o processo de fabrico aditivo em ambiente industrial utilizando materiais termoplásticos para aplicações em alta temperatura e resistência, processo este que traz necessidades muito específicas no que diz respeito ao controlo do equipamento e monitorização do processo.

Assim, facilmente se identifica como necessidade deste projeto de investigação o desenvolvimento de uma HMI customizada ao processo de fabrico aditivo em ambiente industrial, que permita ao operador controlar o equipamento e monitorizar o processo em tempo real.



Figura 1 - HMI para Fabrico Aditivo

1.3 OBJETIVOS

A indústria pode beneficiar bastante da evolução tecnológica dos tempos que correm. A automação industrial que por si só tem evoluído bastante, sofre constantemente de uma maior convergência com o mundo das Tecnologias de Informação que evolui a vários níveis e com uma grande quantidade de tecnologias a emergir.

Pretende-se assim, com este trabalho, dar resposta à necessidade de obter uma HMI orientada ao processo de Fabrico Aditivo, e para tal, foram definidos os seguintes objetivos de alto nível:

- Desenvolver HMI *Web-based*
- Monitorizar e controlar o equipamento e parâmetros do processo em tempo real
- Desenvolver módulo de controlo básico do equipamento: ligar, desligar, pausar equipamento, parar equipamento, monitorizar posição dos eixos e estado geral do equipamento
- Importar remotamente e executar Gcode
- Recolha e armazenamento de dados das impressões
- Visualização de histórico de impressões

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

No presente capítulo faz-se uma contextualização do projeto e do seu âmbito, o propósito em que surge o mesmo e são definidos objetivos de alto nível para o mesmo.

De seguida, no segundo capítulo é feita uma análise ao estado da arte. O capítulo começa por introduzir os conceitos envolvidos, descrevendo alguns fatores essenciais a ter em consideração para atingir os objetivos do projeto e termina com análises a várias abordagens existentes, incluindo uma tabela comparativa de aspectos funcionais e técnicos.

O terceiro capítulo apresenta uma proposta de solução, utilizando como base um protótipo funcional já desenvolvido que valida a arquitetura e tecnologias consideradas e planeadas para utilização no desenvolvimento do projeto.

No quarto capítulo é apresentado o desenvolvimento da solução proposta, sendo que o capítulo começa por descrever a análise e levantamento de requisitos junto dos utilizadores, assim como o desenvolvimento de maquetes, de seguida é apresentada a arquitetura final do sistema, é feita uma avaliação da interface com inclusão de resultados e discussão, e por último é apresentado o sistema desenvolvido assim como os resultados obtidos.

Por fim, o documento termina com o quinto capítulo onde são apresentadas as conclusões retiradas com o desenvolvimento deste trabalho, bem como são apontados caminhos para possíveis implementações futuras.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica das últimas décadas torna o mundo industrial cada vez mais apetecível para investigação de novos métodos de fabrico, para aplicação de novos conceitos ou simplesmente para implementação de inovações do ponto de vista tecnológico. Os fabricantes procuram reduzir custos, otimizar o desempenho de linhas de processo, melhorar a eficiência, reduzir emissão de gases, reduzir gastos de energia, entre outros. Para tudo isto, a informação é vital. Obter a informação certa no momento certo e permitir operadores atuarem sobre o processo em tempo real de forma intuitiva, é fundamental.

Com os avanços que as áreas de automação e de sistemas de informação têm vindo a sofrer há uma tendência cada vez maior para estes se mesclarem, de forma a serem produzidos sistemas capazes de explorar o melhor dos dois mundos, tornando-se assim em ferramentas poderosas e orientadas ao processo em questão.

2.2 AUTOMAÇÃO

A automação consiste num “processo de controlo e de monitorização de atividades e de tarefas de forma autónoma” (Carvalho & Ferrolho, 2016, p. 3), ou seja, na implementação da automação em ambiente industrial procura-se reduzir ao máximo, ou em alguns casos substituir, a intervenção humana por sistemas automáticos (Dorf & Bishop, 2010, p. 7) que podem incluir partes mecânicas, elétricas ou eletrónicas e são apoiados por meios computacionais para operar e controlar equipamentos (como máquinas, processos em fábricas, etc.) e desta forma obter um aumento de produtividade e redução de custos de produção.

2.2.1 HISTÓRIA

Desde há muito tempo que o ser humano procura automatizar atividades que inicialmente eram manuais. As primeiras iniciativas ocorreram ainda na pré-história com invenções como a roda, moinhos de vento ou rodas de água que permitiram economizar esforço, tempo e recursos através de soluções criativas (Soares & Mariano, 2012).

Mais tarde, por alturas do século XVIII, naquela que ficou conhecida como a Revolução Industrial assistiu-se a uma mecanização dos sistemas de produção por intermédio da utilização de ferramentas e máquinas para ajudar o ser humano em tarefas industriais, sendo que os equipamentos seriam ainda operados manualmente. Este passo tinha como objetivo aumentar a produtividade e reduzir os custos.

Em 1920 surgem sistemas automáticos de produção com uma maior rapidez na execução de tarefas e intervenção humana mínima, espelhados nas linhas de montagem arquitetadas por Henry Ford.

Nos anos Pós 2ª Guerra Mundial, por volta dos anos 50, surgem máquinas de comando numérico na produção (CNC) que permitem a produção de peças de grande complexidade e de alta precisão.

Em 1968 acontece um dos pontos mais relevantes da história da automação, com o aparecimento do primeiro Controlador Lógico Programável, conhecido como PLC, por Dick Morley.

Desde então assistiu-se a uma tentativa de normalização das comunicações entre PLCs e a uma integração de sistemas mecânicos, sistemas de controlo de processos e sistemas informáticos.

A automação evoluiu, disseminou-se, e é hoje aplicada em várias áreas ou setores da sociedade, sendo composta por vários ramos de aplicabilidade como por exemplo a automação industrial, a automação comercial ou a automação residencial.

2.2.2 OBJETIVOS

De uma forma geral, os objetivos a atingir com a implementação da automação podem ser enquadrados em dois níveis: a segurança e o mercado. No primeiro, é pretendido que haja uma melhoria das condições de trabalho e de segurança de pessoas e de bens. No segundo, pretende-se aumentar a competitividade global do produto e da empresa, contribuindo assim para que esta se mantenha no trilho que acompanha a evolução e que continue aguerrida na concorrência do mercado.

No que diz respeito à segurança, a implementação de automação num processo de fabrico permite que tarefas consideradas de maior perigo imediato (como prensagem, ou corte) ou mesmo a médio/longo prazo (como soldadura e a pintura que implicam a inalação de gases), possam ser executadas com pouca ou nenhuma intervenção humana. A acrescentar também o perigo das tarefas extremamente repetitivas (mesmo que na teoria sejam consideradas menos perigosas), pois podem levar a estados de cansaço que podem diminuir a capacidade de foco e concentração e podem gerar situações perigosas e pôr em causa a qualidade do produto final.

A automação é, hoje em dia, um meio através do qual é possível atingir melhorias dos padrões de qualidade.

Assim, podemos sintetizar os principais objetivos da automação em:

- Diminuição dos custos
- Aumento de produtividade e flexibilidade
- Melhoria da qualidade
- Inovação do ponto de vista tecnológico
- Integração

2.2.3 COMPONENTES

A automação industrial é composta por alguns componentes essenciais para a sua implementação e desenvolvimento na indústria, entre os quais estão os PLCs, as HMIs, os sensores e as unidades industriais.

Um PLC é um dispositivo standard de controlo industrial que fornece um método simples, mas robusto, para controlar processos dinâmicos de fábrica (Alphonsus & Abdullah, 2016). Proporciona controlo de movimento, controlo de entradas e saídas (*inputs e outputs*) de processos, sistemas distribuídos e controlo de rede.

Dado ser um componente muito orientado para ambientes industriais, é regularmente utilizado em condições e circunstâncias adversas, onde é necessário uma maior precisão e rigor no controlo, e que este aconteça em tempo real através de comunicações fidedignas.



Figura 2 - Exemplo de um PLC.

Fonte: <https://industrial.omron.pt/pt/products/cp1h>

Uma HMI é “uma interface gráfica de utilizador para controlo industrial, que permite visualização, controlo, diagnóstico e gestão de processos”. (Dias & Fonseca, 2015, p. 16)

A HMI deve estar conectada a outros componentes de *hardware* de forma a garantir a comunicação com o mesmo e assim perfazer o sistema industrial.

Um sensor é um equipamento que deteta alterações ou eventos no seu ambiente e fornece entrada de dados para outros componentes eletrónicos. São essenciais para monitorização, inspeção, efetuar medições, entre outras tarefas que sejam necessárias de ser realizadas em tempo real.



Figura 3 - Sensores de proximidade.

Fonte: <https://industrial.omron.ca/en/products/e2b>

As unidades industriais, também conhecidas como *drives* industriais, são “controladores de motores utilizados para operações de controlo otimizado de motores” (Dias & Fonseca, 2015, p. 17). São normalmente utilizados numa vasta diversidade de aplicações industriais e têm a particularidade importante de poderem trabalhar com potências e tensões elevadas. Permitem monitorizar o comportamento dos motores e ajustar o desempenho dos mesmos consoante a tarefa que se pretende realizar.



Figura 4 - Drives industriais.

Fonte: https://www.beckhoff.com/english.asp?drive_technology/ax5000.htm

2.2.4 SOFTWARE PARA AUTOMAÇÃO

Para o contínuo caminho em crescendo da implementação de sistemas de automação na indústria, tem sido imperativa a utilização de *hardware* de controlo e de *software* especificamente desenhado para atuar sobre o mesmo.

O *hardware* de controlo possibilita o armazenamento de dados do processo, e se associado a técnicas de controlo que atuam sobre ele permite atingir maiores graus de confiabilidade relativamente ao seu funcionamento (Souza & Medeiros, 2005, p. 19).

O *software* para automação industrial permite que utilizadores implementem sistemas de controlo e aquisição de dados através de HMIs, sistemas SCADA e servidores OPC. Para tal, na prática, devem estabelecer linhas de comunicação eficientes com componentes de *hardware* como os PLCs, PACs, Servo Motores ou Módulos de *Input* e *Output*.

Existem atualmente no mercado vários casos de sucesso de *software* para automação. São sistemas que têm vindo a maturar com o tempo, melhorar as suas capacidades e fornecer cada vez mais funcionalidades para uma eficaz implementação de sistemas de automação. Alguns desses casos são:

- Twincat, que é um *software* do fabricante Beckhoff, aglomera um conjunto de ferramentas e torna qualquer sistema baseado em PC num sistema de controlo em tempo-real com a possibilidade de ter vários PLCs, NCs, CNCs e/ou sistemas robóticos conectados. O Twincat vai na versão 3 e algumas das funcionalidades mais relevantes providenciadas pelo mesmo são a possibilidade de integração com o

ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio, uma maior liberdade para selecionar linguagens de programação dado que são fornecidas livrarias para conectividade com linguagens mais comuns no mundo do desenvolvimento de software (como C# ou Java), o suporte para a linguagem de programação clássica dos PLCs, a IEC 61131-3, a possibilidade de conectar ao MATLAB, entre outras.

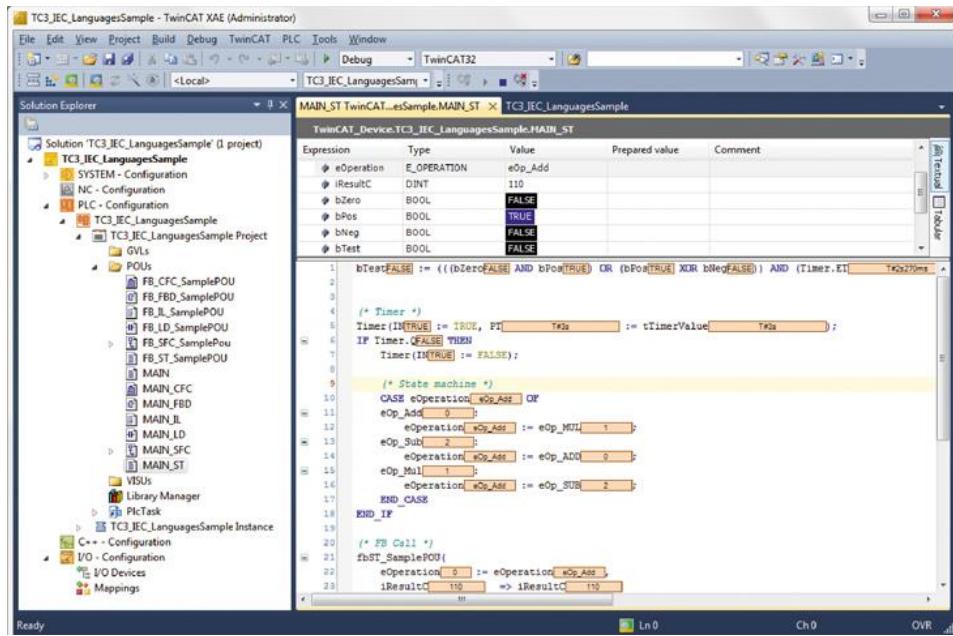


Figura 5 - Ambiente de desenvolvimento Twincat 3.

Fonte: <https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/twincat-3-xa-language-support-iec-61131-3.htm?id=1893323818933250>

- SIMATIC STEP 7, que é um *software* para controladores do fabricante Siemens e fornece um ambiente gráfico *user-friendly* para o utilizador criar projetos, converter projetos de versões anteriores e efetuar migrações. A evolução que este *software* tem sentido, permite que hoje o mesmo ofereça funcionalidades interessantes como maior controlo na criação de variáveis e tipos adicionais de informação tais como ponteiros, matrizes indexadas e estruturas, permite efetuar alterações no código do PLC sem que o autómato esteja em modo parado, efetua automaticamente conversões de dados de pequenas dimensões para formatos de maiores dimensões (como o DIInt ou o Dword) quando necessário, entre outras.

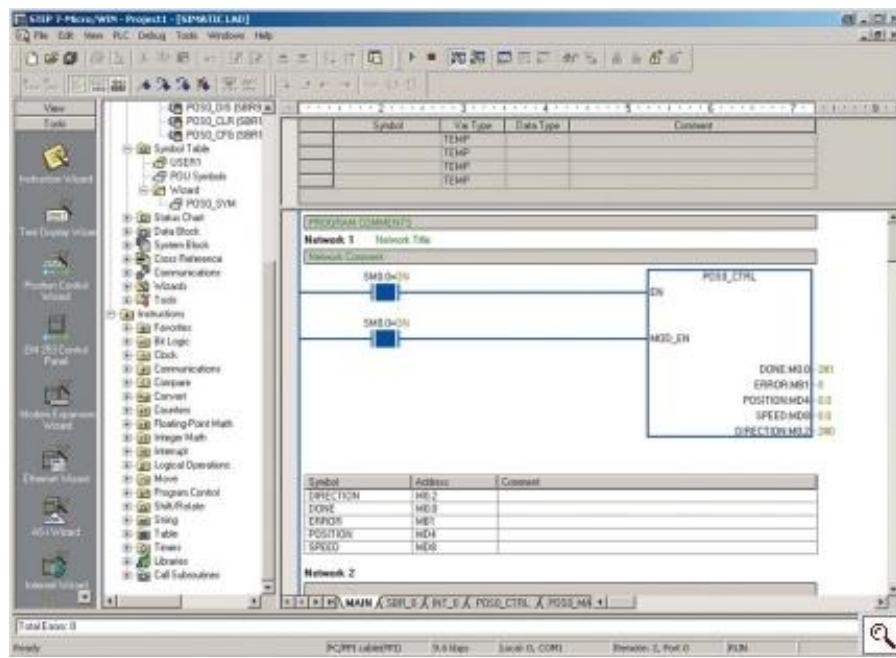


Figura 6 - Ambiente de desenvolvimento SIMATIC STEP 7.

Fonte: <http://www.vr-master.com/simatic-controller-siemens-automation-software.htm>

- PL7, é um *software* para programação de controladores do fabricante Schneider-Electric e oferece características interessantes como módulos de aplicação específica sem a necessidade de programação, funções predefinidas, resolução de erros, alterações com o PLC em estado online, animação por código, entre outras.

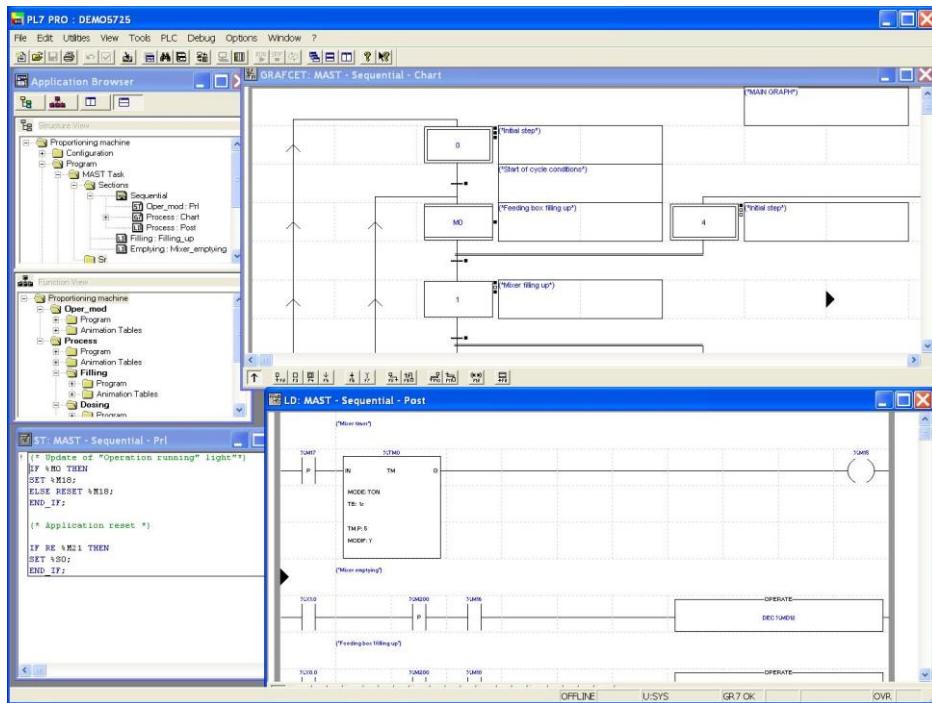


Figura 7 - Ambiente de desenvolvimento PL7.

Fonte: <http://www.elec-intro.com/cms/plus/view.php?aid=11169>

A utilização de *software* dedicado a automação industrial permite a construção de sistemas cada vez mais evoluídos, dado que os próprios softwares têm sofrido transformações em sentido crescente, permitindo trazer hoje em dia benefícios como maior eficácia na monitorização e controlo das operações a decorrer, diagnósticos do estado do sistema e de potenciais problemas com equipamentos, integração e comunicação de forma eficiente com módulos de *input* e *output*, aumento de visibilidade da execução dos processos em tempo real, entre outros.

2.3 INDÚSTRIA 4.0

Esta evolução tecnológica a vários níveis leva-nos até ao termo “Indústria 4.0”, também referenciada como “quarta revolução industrial”, e consiste numa combinação de várias inovações do ponto de vista tecnológico que estão a transformar os setores da energia e da indústria de produção (Boone, 2017). Inovações como robótica avançada, *cloud computing* (computação na nuvem), inteligência artificial, dispositivos móveis (*smartphones*, *tablets*, etc.), impressão 3D, entre outras, todas combinadas estão a mudar a forma como a indústria e os negócios são operados.

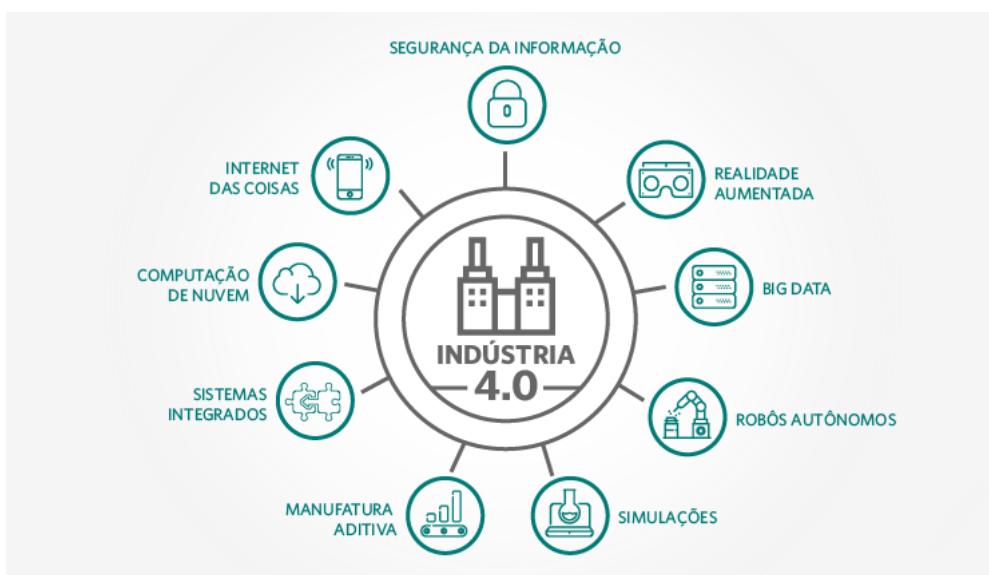


Figura 8 - Indústria 4.0

Fonte: <https://endeavor.org.br/industria-4-0-oportunidades-de-negocio-de-uma-revolucao-que-esta-em-curso/>

Da perspetiva da indústria de produção significa que um *robot* consegue conectar-se remotamente a um sistema computacional e este por sua vez pode controlar *robots* com muito pouca (ou nenhuma) intervenção humana. Estas integrações e relações entre paradigmas trouxeram à superfície o conceito de *smart factories* (fábricas inteligentes) que consistem em sistemas ciber-físicos capazes de monitorizar processos físicos relativos a uma linha de produção (ou processos relacionados). Estes processos físicos serão capazes de comunicar e cooperar entre eles e também com humanos em tempo real. Sintetizando, uma fábrica para ser considerada uma *smart factory* deve incluir os seguintes fatores,

interoperabilidade; transparência na informação; assistência técnica; e tomada de decisões descentralizada (Boone, 2017).

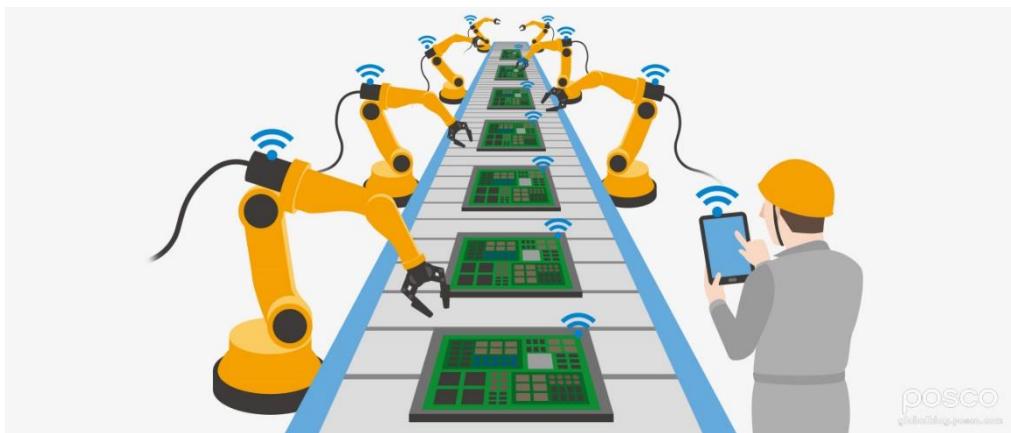


Figura 9 – Ilustração do conceito de Fábrica Inteligente

Fonte: <https://www.linkedin.com/pulse/building-digital-smart-factory-lars-ulph-beng/>

Interoperabilidade refere-se à capacidade de máquinas, dispositivos, sensores e humanos conectarem e comunicarem entre eles, transparência na informação refere-se ao facto de sistemas criarem cópias virtuais de processos físicos através de dados dos sensores para estudarem o contexto da informação. Assistência técnica é a capacidade de um sistema apoiar e guiar humanos na tomada de decisões e na concretização de tarefas que são de alta complexidade ou inseguras. Por último, a tomada de decisões descentralizadas refere-se à capacidade de sistemas ciber-físicos tomarem decisões autonomamente sem intervenção humana.

Dito isto, é fácil perceber que empresas que adotem uma abordagem de “Indústria 4.0” deverão manter alguns aspetos em atenção como a digitalização completa das suas operações que é necessária e a reestruturação de produtos e serviços pode também o ser.

Então pode-se concluir que a “Indústria 4.0” ou a quarta revolução industrial é diferente de revoluções anteriores no sentido em que surge de uma combinação de tecnologias e as suas interações por entre domínios físicos e digitais e estes avanços tecnológicos estão a permitir que empresas se tornem mais eficientes do que nunca.

2.4 TECNOLOGIAS DE SUPORTE

Atualmente a internet é um universo em crescimento de conteúdos, aplicações e serviços interligados. Há armazenamento e partilha de vídeos e de fotos, há conteúdo interativo, há monitorização em tempo real de forma remota, há acessos via dispositivos móveis como *smartphones* ou *tablets*, etc. Tudo isto é possibilitado pela interação de tecnologias da internet e da web e através da evolução dos *browsers* que proporcionam hoje em dia novas e cada vez mais completas experiências aos utilizadores. A evolução destes dois pilares tem sustentado o enorme crescimento da internet como ferramenta de trabalho, de entretenimento, de pesquisa, de leitura, etc.

2.4.1 REDES E INTERNET

Foi durante os anos da Guerra Fria que começaram a ser introduzidos os computadores como ferramentas de comunicação e controlo de informações (Edwards, 1996).

Em 1957 os Estados Unidos criaram a ARPA (Advanced Research Projects Agency), uma agência de investigação dentro do Departamento de Defesa, com o grande objetivo de liderar ao nível da ciência e tecnologia militar dado que se vivia uma era de armas nucleares e também com a visão de construir uma rede de comunicações entre os locais mais críticos do sistema de defesa do país que garantisse que havia uma descentralização da informação mais sigilosa, dado que havia suspeções acerca da possibilidade de sofrerem um ataque inimigo.

A rede de comunicações devia ser robusta, pois era necessário que a mesma garantisse que a comunicação fluía sem problemas entre as regiões não afetadas, em caso de ataque nuclear. Esta rede foi designada de ARPANET (Strawn, 2014).

A ARPANET utilizava o protocolo TCP/IP para transmissão de dados, no qual a informação era dividida em pequenos pacotes juntamente com o endereço do destinatário e informação que permite a reconstrução da mensagem original.

A evolução da rede foi gradual, pois aos poucos foram sendo ligados cada vez mais nodos e em 1975 havia já 57 nodos conectados.

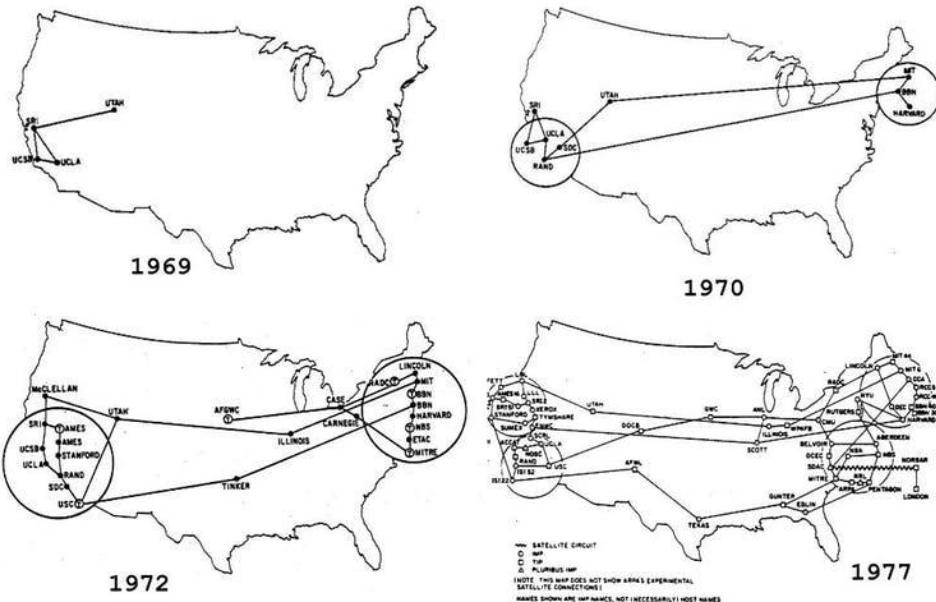


Figura 10 - Evolução da Arpanet.

Fonte: <http://theconversation.com/how-the-internet-was-born-from-the-arpnet-to-the-internet-68072>

O ataque inimigo acabou por não acontecer, mas já tinham sido dados os primeiros passos para a criação do que é hoje a internet.

Com o aparecimento das redes na indústria e com a chegada dos microprocessadores ao chão de fábrica, a visão existente até então sobre estas mudou bastante. As redes passaram a permitir uma comunicação rápida e confiável entre equipamentos e também a utilização de padrões estratégicos, que se tornaram fatores essenciais naquilo que é a produtividade industrial de hoje.

A introdução das redes em ambiente industrial aconteceu na década de 1960 através dos sinais elétricos analógicos (Nogueira, 2009) e permitiu que houvesse uma substituição dos tubos utilizados para transmissão pneumática, reduzindo assim o custo de instalação dos sistemas e respetivo tempo de transmissão dos sinais.

Atualmente existem redes industriais que se ligam inclusive a sistemas de gestão das empresas ou a sistemas supervisórios e que permitem uma grande transparência do fluxo de informação pois qualquer pessoa da hierarquia pode aceder a informação do chão de fábrica em tempo real.

2.4.2 TECNOLOGIAS WEB

Com o crescimento e disseminação das redes de computadores a nível mundial, um conjunto de tecnologias e ferramentas emergiram, tornando-se uma necessidade constante a sua melhoria e evolução. Um desses casos foi o HTTP (HyperText Transfer Protocol), que é um protocolo de comunicação baseado em pedidos (*Requests*) e respostas (*Responses*) e é a base da World Wide Web (Berners-Lee, 1991). Foi inventado por Tim Berners-Lee em 1990 e já sofreu algumas alterações, mas manteve sempre a simplicidade que o caracteriza.

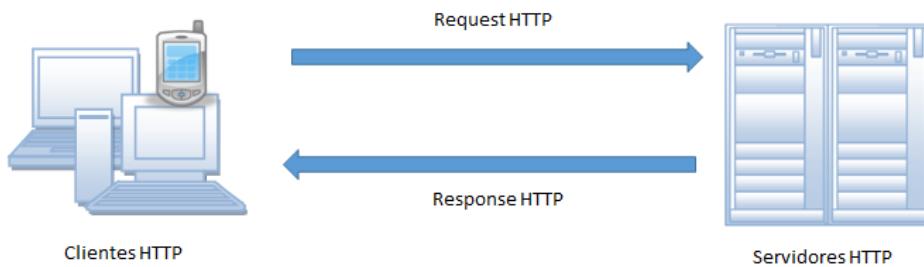


Figura 11 - Arquitetura do protocolo HTTP

Em 1997 foi publicada a primeira versão standard do protocolo HTTP, a versão HTTP/1.1 que serviu para clarificar algumas ambiguidades e trazer algumas vantagens, como a reutilização de conexões, as respostas partidas em “pedaços” ou a negociação de conteúdo entre cliente e servidor (como o idioma, por exemplo).

Uma das maiores alterações ao protocolo HTTP foi implementada em 1994 quando foi criada pela empresa Netscape Communications uma camada adicional de transmissão encriptada sobre o mesmo, de nome SSL. Entretanto, este sofreu algumas evoluções e eventualmente passou a ser TLS.

Esta alteração permitiu que as mensagens trocadas entre cliente e servidor no protocolo HTTP passassem a ser encriptadas, sendo assim garantida a autenticidade e a proteção das mesmas. Esta é a base do aparecimento do que é conhecido hoje como HTTPS.

Em Maio de 2015 foi publicada a versão *standard* mais recente do protocolo HTTP, o HTTP/2. Esta versão trouxe algumas diferenças em relação à anterior, como o facto de

permitir um servidor popular a cache do cliente, ou o facto de ser um protocolo multiplexado, isto é, permite pedidos paralelos na mesma conexão.

O *feedback* acerca da implementação do HTTP/2 nos websites tem sido positivo, dado que até Junho de 2017, 14.7% dos mesmos já estavam a utilizar esta versão do protocolo (“HTTP/2 Usage,” 2017).

O protocolo HTTP está em constante evolução e novas capacidades e funcionalidades estão a ser testadas para serem integradas, que prova que o HTTP tem uma forte capacidade de ser extensível apesar de manter a simplicidade para a qual foi criado.

Outro caso de tecnologias que emergiram com a disseminação da rede de computadores a nível mundial e se tornaram necessidades foram as linguagens de programação orientadas para a web, que são as responsáveis por permitir que os utilizadores visualizem conteúdos de *websites* e executem funcionalidades dentro dos mesmos. Estas sofreram uma evolução enorme desde o seu aparecimento, que permitiram que a web se transformasse na poderosíssima ferramenta que é hoje. As mais variadas áreas de aplicabilidade foram atingidas pelas enormes capacidades da web, mas para isso foi essencial que as suas tecnologias se adaptassem e se transformassem, trazendo constantemente novas habilidades para que os programadores pudessem tirar partido.

As linguagens de desenvolvimento para a web deram um primeiro passo com o aparecimento do HTML (HyperText Markup Language), que apesar de ter sido desenvolvido durante os anos 80, apenas apareceu no final da década, em 1989, quando Tim Berners-Lee propôs desenvolver a rede e a forma de consultar os ficheiros remotamente seria utilizando o HTML.

O HTML é uma linguagem baseada em etiquetas (ou “*tags*”) com as quais se define e estrutura as páginas web. Com as etiquetas que vêm descritas no conteúdo dos ficheiros, o *browser* consegue disponibilizar ao utilizador o seu conteúdo, que pode incluir textos, imagens, vídeos, etc. O HTML está atualmente na versão 5.2 (“HTML 5.2 W3C Recommendation,” 2017) e está muito relacionado com as CSS, que são folhas de estilo que descrevem como os elementos HTML serão apresentados no agente no *browser*, do ponto de vista estético e organizacional.

Uma outra tecnologia que tem sido fundamental no desenvolvimento e na evolução da web é o Javascript, que nasceu em 1995 quando a equipa que desenvolveu o primeiro *browser* popular, o Netscape, sentiu a necessidade de expandir a web, de encontrar uma forma que a tornasse mais interativa, mais dinâmica. A web, que era estática na altura, precisava de

uma forma de interagir dinamicamente com o conteúdo que exibia, precisava de uma linguagem de *scripting* que não fosse tão orientada aos programadores numa altura em que a linguagem Java estava a dar cartas, mas sim mais orientada a pessoas que não estivessem num nível tão alto de conhecimento. Nasceu assim a linguagem que supriu estas necessidades, que numa fase inicial foi chamada de Mocha e que é hoje um dos motores da web.

O Javascript é uma linguagem de programação que nasceu como *client-side*, que significa que o código fonte era processado no *browser* e não num servidor web, ou seja, uma função javascript pode ser executada após uma página web ser carregada e sem comunicar com o servidor. Um exemplo prático e comum em muitas páginas é a validação de formulários, desta forma a página disponibiliza uma função a validar se o formulário está bem preenchido antes sequer de comunicar com o servidor.

O Javascript evoluiu bastante e nos dias que correm já se estendem a outras funcionalidades bem mais complexas do que a validação de formulários, inclusive existem servidores web baseados em Javascript (como por exemplo os baseados na plataforma Node.js).

O HTML juntamente com a CSS e o Javascript formam o conjunto de tecnologias base da web ao nível do lado cliente.

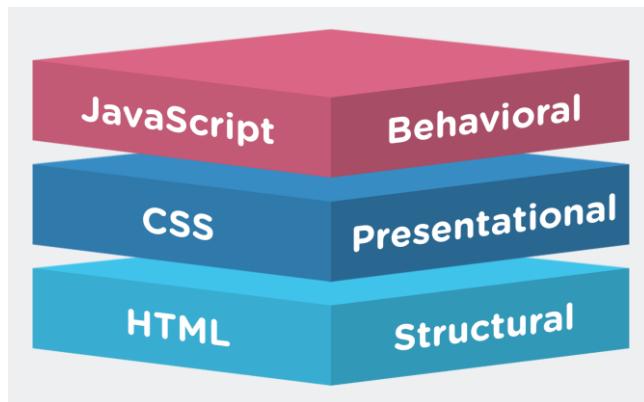


Figura 12 – Lado cliente da web.

Fonte: <http://bulbulcse.com/2016/06/02/html-vs-css-2/>

No entanto, convém também fazer referência ao lado servidor da web. O cliente envia pedidos para um servidor onde podem estar alojados *scripts*, cálculos, algoritmos capazes

de tratar do pedido efetuado e devolver uma resposta. Esse lado pode também ser complementado por bases de dados para armazenar informação.

Nos primórdios da web o *scripting* do lado servidor era desempenhado quase exclusivamente através de uma combinação de linguagens e tecnologias (C, Perl, Shell, etc.) que eram executados pelo sistema operativo e os resultados eram servidos de volta pelo servidor web. Atualmente, muitos servidores web modernos conseguem executar diretamente os *scripts*. Exemplos disso são linguagens como ASP, JSP, Perl, PHP, NodeJS, entre outras, que se encontram já bastante disseminadas pela web.

Assim, temos os componentes fundamentais para a arquitetura base de uma aplicação orientada para a web:

- Cliente (user agent) – São aplicações que atua em representação de um utilizador. No contexto da Web são tipicamente os *browsers* que enviam os pedidos e processam e apresentam as respostas recorrendo-se de um conjunto de tecnologias (HTML, CSS e Javascript)
- Servidor – Servidores HTTP que podem recorrer a um conjunto de linguagens de programação com possibilidade de comunicação com Bases de Dados

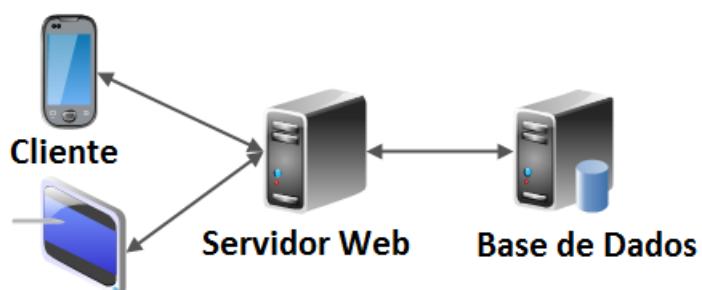


Figura 13 - Arquitetura base de aplicações web

Ao longo dos anos o desenvolvimento para a web evoluiu em vários sentidos, foram criados novos estilos arquiteturais, novos padrões para desenhar uma aplicação, novas ferramentas foram sendo também disponibilizadas aos programadores, novas linguagens e plataformas foram sendo construídas e hoje quando surge necessidade de criação de uma aplicação

web, a oferta tecnológica é vasta, e por isso convém definir bem quais as necessidades e os requisitos que a aplicação terá antes de tomar decisões do foro técnico.

2.4.3 CLOUD COMPUTING

Outro paradigma tecnológico que emergiu ao longo dos últimos anos e teve a capacidade de mudar a forma como são fornecidos os serviços de TI é o *Cloud Computing* (computação em nuvem).

O *Cloud Computing* consiste em “mover serviços, poder computacional ou dados para uma localização transparente, interna ou externa à organização em instalações centralizadas ou contratadas” (“Cloud Computing: An Overview,” 2009) e é um conceito assente em cinco pilares, nomeadamente o agrupamento de recursos, isto é, o fornecedor de serviços de *Cloud Computing* disponibiliza um ambiente em que os recursos são agregados por segmento (como o disco/armazenamento, a memória ou o processador) sendo assim criada uma camada de recursos para os subscritores, a virtualização de recursos computacionais que é fundamental para este conceito, visto que permite obter uma alta utilização de cada servidor tornando o conceito rentável, a elasticidade, isto é, escalabilidade dinâmica que provém da capacidade de adaptação da disponibilidade de um recurso consoante a sua necessidade, a automatização da criação e configuração de novas instâncias virtuais que permite que de uma forma bastante ágil e rápida uma aplicação baseada na *cloud* possa ser abastecida de novas instâncias consoante a necessidade, e por último o modelo de faturação, conhecido como *pay-as-you-go*, que cobra apenas pelos serviços que são utilizados e durante o seu tempo de utilização, o que torna o modelo bastante flexível e reduz as necessidades de investimento, sobretudo em fases iniciais (Rosenberg & Mateos, 2010).

Este paradigma traz alguns benefícios que acabam por ser consequências dos pilares em que o mesmo assenta, como a capacidade de multiutilização a larga-escala que acaba por trazer vantagens económicas muito significativas, o facto de ser baseado num modelo de *self-service* permite que se transforme elevados custos fixos em despesas variáveis, traz flexibilidade e grande capacidade de escalabilidade, traz uma plataforma onde terceiros podem acrescentar valor, entre outros.

O *Cloud Computing* fornece serviços baseado em quatro modelos diferentes, *Infrastructure as a Service* (IaaS), também conhecido como *Hardware as a Service*, que é um modelo onde o utilizador é servido da própria infraestrutura com as características escolhidas e toda a

configuração e administração do ambiente – sistema operativo e aplicações - será da responsabilidade do utilizador. É o modelo de serviço fornecido com maior nível de granularidade e com o menor número de funcionalidades pré-configuradas.

Outro modelo de serviço baseado na *cloud* é o *Platform as a Service* (PaaS), que inclui não só a infraestrutura, mas também o sistema operativo, ferramentas de programação, serviços de gestão de bases de dados, entre outros, e permite que os utilizadores alojem aplicações. A principal diferença em relação ao modelo *Infrastructure as a Service* é que o utilizador tem menos controlo sobre o núcleo do sistema, pois configuração e administração do ambiente não é da responsabilidade do utilizador, mas sim do fornecedor.

O terceiro modelo de serviço é o *Software as a Service* (SaaS) em que o fornecedor gere o *hardware* e o ambiente, fornece soluções completas de *software* na sua infraestrutura para uso dos utilizadores e tem a responsabilidade de garantir a disponibilidade e a segurança das aplicações bem como os seus dados. Este modelo permite a uma organização colocar em funcionamento uma aplicação de forma rápida e com investimento inicial reduzido.

Por último, o modelo *Framework as a Service* (FaaS) que é um ambiente auxiliar ao *Software as a Service* e permite que os programadores estendam ou evoluam as suas funcionalidades pré-configuradas. De uma forma geral este modelo é útil para casos em que se pretende aumentar ou ir para além das capacidades base providenciadas pelo modelo *Software as a Service*.

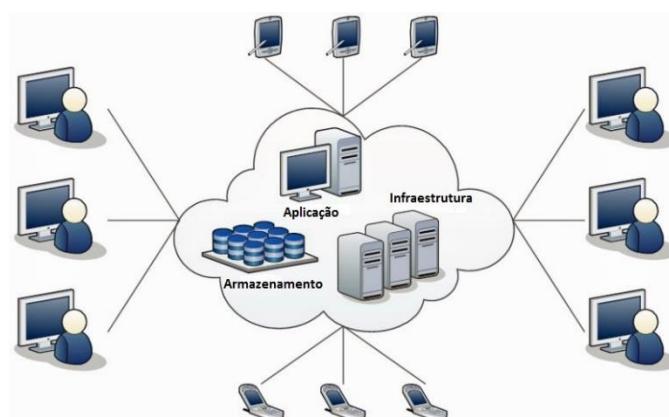


Figura 14 - Arquitetura Cloud Computing

O mundo da automação industrial pode beneficiar bastante da convergência com paradigmas e tecnologias emergentes, tirando por exemplo partido da capacidade de resposta das mesmas, das animações ricas e que podem proporcionar melhores experiências e da integração natural com outras partes da infraestrutura corporativa. Este conceito abre caminho para que todos os participantes de um determinado ciclo de produção possam obter acesso a informação acerca do mesmo de forma remota e em tempo real.

2.4.4 HUMAN-MACHINE INTERFACES

O ponto de contacto entre um operador e uma máquina é fundamental e quanto mais capaz este for de fornecer a informação certa no momento certo e de providenciar as melhores ferramentas ao operador, melhor este pode atuar. Com os avanços tecnológicos já descritos, este ponto de contacto, que é a HMI, pode tornar-se numa interface inteligente que assiste e guia o operador nas suas decisões e nas suas ações.

Uma HMI pode-se descrever como uma combinação entre componentes de *hardware* e *software* que, juntos, têm a capacidade de fornecer ao utilizador as ferramentas e a informação necessária para que este seja capaz de manusear, monitorizar e controlar um equipamento. As HMIs estão presentes nos mais variados tipos de sistemas/equipamentos para os mais diversos fins, como no controlo de comboios, máquinas de CNC, equipamento de laboratório médico, etc., e todas devem conter todos os elementos necessários para uma utilização/manuseio completo por parte do utilizador (“How to best design an HMI system: a proper interface between a machine and its human operator greatly impacts efficiency and ease of use and should promote a harmonized connection between the two. Learn how to best build that connection though a human mac,” 2015).



Figura 15 - Human-Machine Interface.

Fonte: <http://library.automationdirect.com/tips-better-hmi-layout>

Uma HMI deve ter em consideração fatores como a segurança, ergonomia, os *standards* da indústria, uma clara definição dos requisitos funcionais, o nível de conhecimento do operador, etc.

É essencial que a HMI desenvolvida responda claramente às seguintes questões:

- Quantas e quais serão as funções controladas pela interface?
- Como será controlada cada função? Existem diversas possibilidades como botões, *switches*, etc.
- Qual o tipo de *feedback* a dar ao operador que melhor serve o propósito quando este está a executar funções na HMI?
- Para cada função na HMI, o operador necessita de obter que informação prévia?

Segundo artigo divulgado pela revista “Control Engineering” (“How to best design an HMI system: a proper interface between a machine and its human operator greatly impacts efficiency and ease of use and should promote a harmonized connection between the two. Learn how to best build that connection though a human mac,” 2015), para qualquer que seja o nível de conhecimento do operador (iniciante ou avançado), a HMI deve considerar os seguintes fatores ergonómicos:

- *Panel Layout*: o ecrã deve ser desenhado para fornecer ao operador grupos de informação relacionada de uma forma previsível e consistente.
- Seleção de componentes da HMI
- Esquema de cores: a chave para um esquema de cores eficiente é a simplicidade. Demasiadas cores devem ser evitadas e o modelo do semáforo para ações chave pode ser usado, como vermelho para *Stop*, amarelo para avisos e verde para *OK/Start*.
- *Feedback*: o *Feedback* é crítico para a eficiência e eficácia do operador e este pode ser visual, sonoro, tátil ou uma combinação destes.
- Considerações de segurança

Uma HMI deve ter a capacidade de comunicar com o sistema/equipamento que está debaixo do seu controlo, assim como outros sistemas/equipamentos que estejam possivelmente relacionados.

De realçar ainda a importância da percepção do ambiente físico a que a HMI estará exposta, situações como exposição a altas temperaturas, contacto com líquidos, humidade, devem ser consideradas para fornecer a melhor e mais adequada proteção à mesma.

Ainda o mesmo artigo refere que uma interface apropriada entre a máquina e o operador humano tem um grande impacto na eficiência e na facilidade de uso da mesma, e deve promover uma ligação harmoniosa entre ambos, constatando também que uma HMI para ser confiável e fornecer um desempenho seguro, eficiente e intuitivo depende da aplicação das melhores práticas de engenharia no *design*, na produção, nos testes e nos processos de garantia de qualidade.

2.4.5 REALIDADE AUMENTADA

No largo espectro das TI há várias áreas que têm vindo a emergir para além do foro da investigação. Vários ramos têm vindo a ser apostar quer na indústria, quer num contexto mais empresarial, devido ao seu estado de maturação que pode já ser suficientemente sólido para valer o risco e aos benefícios que podem trazer.

Um destes casos é a Realidade Aumentada, que pode ser definida como uma tecnologia que combina objetos virtuais e reais envolvidos por um ambiente real, é interativa, corre em tempo real e tem a capacidade de alinhar objetos virtuais com objetos reais (Azuma et al., 2001). A sua interatividade e reação quer a acontecimentos do mundo real, quer a ações do utilizador, fornecem uma interface digital ao mundo real (Mohn, 2015). Tipicamente são utilizados acessórios como óculos ou *smartphones* para projetar estas interfaces digitais no mundo real.

Os primeiros dispositivos disponibilizados para o público e que não foram direcionados para os jogos de computador ou consolas surgiram em 2012 com o aparecimento dos Google Glass, que foram desenhados para munir os utilizadores de interfaces digitais que os permitissem interagir de forma similar a que interagimos hoje com um *smartphone*, ou seja tirar fotografias, procurar direções, etc. No entanto, os Google Glass não se revelaram um sucesso apesar das grandes empresas tecnológicas acreditarem que os acessórios tecnológicos como óculos, relógios ou pulseiras se tornariam eventualmente partes normais do dia a dia na sociedade.

Entretanto outras tecnológicas apostaram no desenvolvimento desta tecnologia, como foi o caso da Magic Leap e mais tarde da Microsoft com o produto Hololens. Estas empresas têm planos para o futuro da Realidade Aumentada, no entanto ainda encontram alguns obstáculos, como por exemplo desenvolverem acessórios tecnológicos que sejam pequenos e leves o suficiente, mas também computacionalmente poderosos o suficiente para proporcionarem a sensação de realidade (Mehdi Mekni, 2014, p. 210). O desempenho da

tecnologia de Realidade Aumentada é, neste momento, uma das características na qual as empresas estão a investir para tornarem possível uma integração com o mundo real o mais suave e natural possível. Apesar disto vários setores da indústria têm vindo a apostar na integração de produtos de Realidade Aumentada, como são o caso do turismo onde já existem aplicações para *smartphone* capazes de dar informação ao utilizador acerca da realidade captada na câmara, ou o setor da indústria de produção onde aplicações para *smartphone* ajudam trabalhadores de armazéns a localizar objetos e ordenar pacotes, ou o setor da saúde onde criaram uma plataforma suportada por vídeo chamada Viipar que funciona via Google Glass e ajuda um cirurgião durante uma cirurgia servindo de guia, entre outros.

2.4.6 SISTEMAS SCADA

Sistemas SCADA são sistemas que utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar e apoiar a monitorização e controlo de processos industriais (Constatin, Queiroz, & Catarina, 2011).

O termo SCADA provém do inglês “Supervisory Control and Data Acquisition”, cuja tradução literal é Controlo Supervisório e Aquisição de Dados, e como o próprio nome indica o foco do sistema é a um nível supervisório, ou seja, é um pacote de *software* que se posiciona por cima do *hardware* com o qual faz interface (Daneels & Salter, 1999, p. 339).

Este tipo de sistemas está bastante implementado em ambientes industriais e tem capacidades para apoiar em sistemas complexos ou geograficamente dispersos, na medida em que podem recolher os dados de grandes quantidades de fontes para depois serem apresentados a um operador de maneira intuitiva e amigável. A vantagem da implementação de sistemas SCADA em processos industriais, é que estes fornecem a informação em tempo oportuno, permitindo assim controlar e monitorizar processos e tomar decisões operacionais da forma mais apropriada.

De uma forma genérica pode-se arquitetar um sistema SCADA de acordo com a figura seguinte.

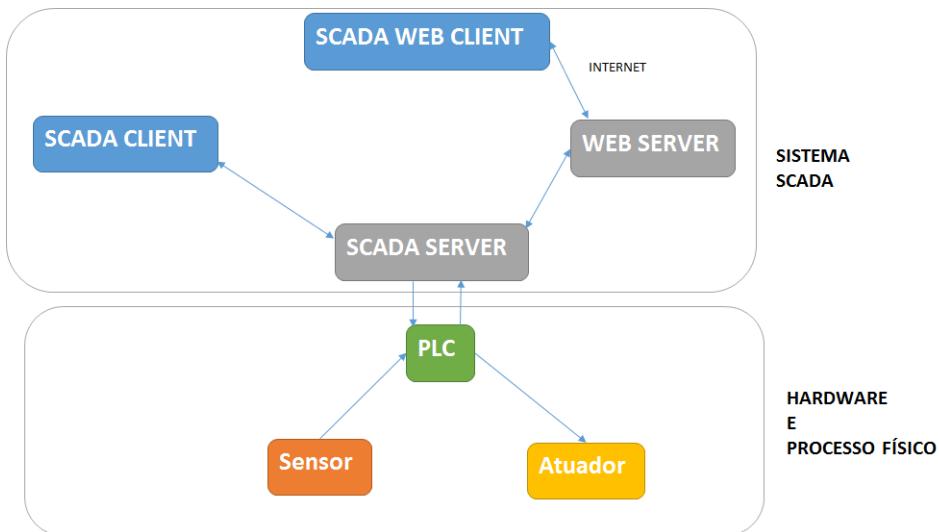


Figura 16 – Arquitetura de um Sistema SCADA

Através da Figura anterior é possível constatar que um sistema SCADA pode basear-se em: um *SCADA Server* para integrar toda a informação oriunda dos PLCs e/ou dos clientes de forma a tornar todos os componentes do sistema num sistema único e integrado, clientes SCADA diretamente ligados (por exemplo por *Ethernet*) ao *SCADA Server*, um *Web Server* para servir através de protocolos web, e clientes SCADA web que conectam com o *Web Server* através da internet. Adjacente ao sistema SCADA estão sensores e atuadores no processo físico para obter informação do mesmo e atuar sobre ele, um ou mais PLCs para receber a informação do processo físico e dar as ordens a executar sobre o mesmo. No entanto é relevante realçar que este é apenas um esboço de uma possível arquitetura de sistemas SCADA e que os mesmos podem ser mais complexos.

Algumas das funcionalidades típicas de sistemas SCADA são:

- Controlo de acessos: utilizadores são definidos por grupos com as respetivas permissões
- Criação de diagramas sinópticos que representam determinadas áreas do processo. Este tipo de diagrama é no fundo uma representação com a estrutura e arquitetura do processo onde se podem utilizar imagens/objetos gráficos ou texto
- Conceito de objetos gráficos que ficam ligados a variáveis do processo: normalmente estes objetos vêm incluídos em livrarias gráficas e podem ser utilizados nos diagramas sinópticos
- Gráficos de tendências das variáveis do processo: permitem analisar de forma rápida e intuitiva a evolução das mesmas
- Alarmística: permite monitorizar automaticamente determinadas variáveis do processo e assim que cumpridas certas restrições, lançar alarmes para o operador

- Histórico: registo de todos os eventos relevantes ao processo
- Relatórios: compilar determinada informação em formato de relatórios de forma a tornar a tomada de decisão mais eficaz
- Controlo de processos: código desenvolvido em linguagens de programação (como Visual Basic, C ou até Java) pode ser incorporado em sistemas SCADA de forma a poder programar tarefas que respondam a eventos do sistema. Por exemplo enviar comandos ao sistema de controlo para ligar ou desligar equipamentos, entre outros

Assim, de uma forma resumida pode-se considerar que os sistemas SCADA trazem potenciais benefícios como a capacidade de detalhar automaticamente a natureza e gravidade de determinados problemas em áreas do processo eliminando a necessidade de monitorização manual, a possibilidade de acesso remoto ao sistema através da Internet e um portátil/*smartphone/tablet* que permite maior controlo e monitorização, operadores deixam de ter necessidade de manter centenas de registos relativos a variáveis do processo dado que o sistema permite acesso a esta informação a qualquer momento, a utilização deste tipo de sistemas garante que todas as áreas do processo envolvidas são integradas numa plataforma comum permitindo um melhor relacionamento entre os dados, entre outros.

2.5 FABRICO ADITIVO

O Fabrico Aditivo, também conhecido como impressão a três dimensões, consiste em produzir um objeto sólido, em três dimensões, proveniente de um ficheiro digital (Canas & Pires, 2014, p. 10), e a criação/produção deste objeto é realizada através de processos aditivos que consistem em imprimir camadas sucessivas com recurso a um determinado material e, por vezes, em determinadas condições (como temperatura, humidade, etc.). O processo de impressão das peças é possível através da extrusão de material em estado semilíquido (cuja temperatura pode variar) e de um bico para o efeito que vai permitir construir as sucessivas camadas.



Figura 17 – Ilustração de sistema de fabrico aditivo.

Fonte: <http://fos.cmb.ac.lk/blog/3d-printing-magic-created-science/>

O processo de Fabrico Aditivo começou com Chuck Hull, em 1984, quando este criou um processo conhecido como estereolitografia, que utilizava lasers ultravioleta para curar foto polímeros. O mesmo Chuck Hull também foi o criador do formato de ficheiros STL (“3D printing -- Additive manufacturing: An introduction.,” 2014) que ainda hoje é bastante aceite pelo *software* das impressoras 3D.

Uma das grandes vantagens do fabrico aditivo e que rotulou este processo de prototipagem rápida, foi a possibilidade de confeção de partes de plástico de uma forma rápida, já que o processo tradicional demorava entre seis a oito semanas e mesmo assim as peças ainda poderiam necessitar de ser trabalhadas devido a problemas na manufatura. Assim, a impressora 3D já demonstrava a flexibilidade e rapidez do processo e como isso poderiam ser excelentes características a seu favor.

Ao longo dos anos, o fabrico aditivo continuou o seu caminho evolutivo com a adição de novos materiais a serem impressos em três dimensões, com a melhoria na precisão da impressão e também com várias empresas a lançarem-se no mercado inovando em vários aspectos. Hoje em dia já é possível imprimir através de várias técnicas de impressão assim como utilizar vários tipos de material para o efeito, como por exemplo: plásticos; metais; e cerâmicas, entre outros.

Apesar de nesta altura os meios de produção tradicionais ainda oferecerem algumas vantagens, nomeadamente em produção de larga escala, o fabrico aditivo já oferece vários benefícios (Berman, 2012), como:

- Customização em massa – a possibilidade de criar designs customizados abre portas a possibilidades ilimitadas.
- Novas capacidades – produtos complexos podem ser produzidos sem investimentos avultados e com custos variáveis mais baixos do que métodos tradicionais.
- Tempo de entrega – o *design* e os ciclos de produção sofrem um grande aumento de velocidade, que torna possível que o produto chegue ao mercado mais rapidamente.
- Cadeia de fornecimento simplificada – a produção está mais perto do ponto de entrega, que simplifica o processo do ponto de vista do inventário.
- Redução de desperdícios – materiais não utilizados podem ser reutilizados para impressão sucessiva, o que significa que o desperdício será menor.

Atualmente o fabrico aditivo ainda prevalece na prototipagem e na produção de lotes mais pequenos, no entanto já tem bastantes aplicações nas várias indústrias:

- Indústria Automóvel: componentes específicos para produção de motores, *designs* inovadores como conceitos de chassis.
- Indústria Aeroespacial: bicos de combustível de aeronaves, partes de motores a jato.
- Indústria Médica: implantes para a anca ou espinha.
- Entre outros.

Neste momento pode-se afirmar que o fabrico aditivo já é uma solução viável para prototipagem ou para produção de baixa escala. Agora o desafio é evoluir o seu *hardware* de forma a atingir os requisitos técnicos e de custo necessários para suportar produção de grande escala.

2.6 TRABALHO RELACIONADO

2.6.1 CONTROLO E AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA

Os sistemas para controlo e automação estão já bastante disseminados pelos vários setores da indústria. São bastantes os casos de sucesso de sistemas implementados que otimizaram, reduziram custos, melhoraram eficácia, melhoraram os níveis de segurança, entre outras vantagens que o controlo e a automação trazem para um processo.

Numa companhia do setor automóvel foram implementados processos de automação, mais concretamente baseados em SPC (Processo de Controlo Estatístico) para procedimentos de inspeção final de produtos, de forma a garantirem maior robustez e mais qualidade efetiva nos mesmos (Guerra, Sousa, & Nunes, 2016). Um SPC é uma técnica poderosa para monitorizar, analisar, gerir e melhorar a performance de processos através da utilização de métodos estatísticos, e permite avaliar a variabilidade existente num determinado processo de produção, assim como permite disparar certas ações de controlo.

As principais razões que levaram à implementação de automação das operações de garantia de qualidade dos produtos foram: poder ter uma base de dados que agrupa todos os dados das medidas tiradas durante processos de produção, melhorar procedimentos de rastreabilidade dos dados, tornar os dados mais confiáveis, aumentar a eficiência do SPC existente e também a dificuldade que existia em realizarem vários tipos de estudo estatístico.

Na implementação de um novo processo de automação é imperativo compreender todos os procedimentos envolvidos, e como tal foi necessário desenvolver um plano de implementação. Isto envolve conhecer as características dos produtos, conhecer a informação necessária para possibilitar a rastreabilidade dos dados coletados, ou qual o tratamento dado a características críticas da qualidade do produto, foram aspectos a ter em conta dada a sua relevância para o processo. Além disto, o plano de implementação envolveu estudar e analisar o software adquirido (Q-DAS devido à sua eficiência em armazenar e analisar dados) para o processo de automação, criar uma equipa multidisciplinar, instalar o hardware necessário e desenhar a interface entre o equipamento de monitorização e o software.

Após implementado o processo de controlo e automação para inspeção da qualidade dos produtos foi possível verificar que houve ganhos no que diz respeito ao tempo para executar tarefas de medição da qualidade, sendo que para a inspeção de um lote de produção houve

ganhos totais de 18 minutos (ver Figura seguinte) em comparação com os procedimentos prévios à implementação.

TABLE I
DURATION OF MEASUREMENT PROCESS BEFORE AUTOMATION

Quality characteristic / statistical analysis	Time spent (sample of 50 items)
closed gap	00:06:40
radial thickness	00:04:32
parallel height	00:06:24
tangential force	00:06:42
<i>statistical analysis</i>	00:09:07
Total time (h:min:s)	00:33:25

TABLE II
DURATION OF MEASUREMENT PROCESS AFTER AUTOMATION

Quality characteristic / statistical analysis	Time spent (sample of 50 items)
closed gap	00:03:57
radial thickness	00:02:44
parallel height	00:04:10
tangential force	00:04:52
<i>statistical analysis</i>	00:00:00
Total time (h:min:s)	00:15:43

Figura 18 - Ganhos de Tempo.

Fonte: (Guerra et al., 2016)

Considerando que em média esta estação executa 5 inspeções por dia, perfazendo um total de 1125 inspeções anuais, que representam ganhos de 338 horas de produção (Guerra et al., 2016).

Na indústria alimentar também tem sido apostado a implementação de sistemas de controlo e automação. A revista “Control Engineering” (Gill, 2017) relata que a pressão exercida pelos consumidores e pelos retalhistas para que sejam produzidos mais alimentos de forma segura, está a levar a um forte investimento em automação.

Um outro caso na indústria da pesca onde foi proposta a introdução de soluções de automação no processo de embalamento e paletização que é realizado no fim da linha de processamento de salmão de uma empresa baseada na Noruega (Kerezovic & Sziebig, 2016). Devido à expansão da empresa, novas instalações estão em construção e faz parte dos planos da mesma investir em soluções tecnológicas modernas que tragam qualidade e velocidade ao processamento do peixe, assim como redução do trabalho manual e respetivos custos.

O embalamento e paletização (“palletization”) de fim de linha inclui várias ações como carregar filetes para caixas abertas, pesar, fechar e catalogar as caixas, passar as caixas por detetor de metais e paletizar os produtos. Estas ações até à proposta de solução de automação eram executadas manualmente.

A solução proposta consistia numa linha automatizada capaz de abrir, fechar, pesar, catalogar e paletizar as caixas, como é possível verificar na Figura seguinte.

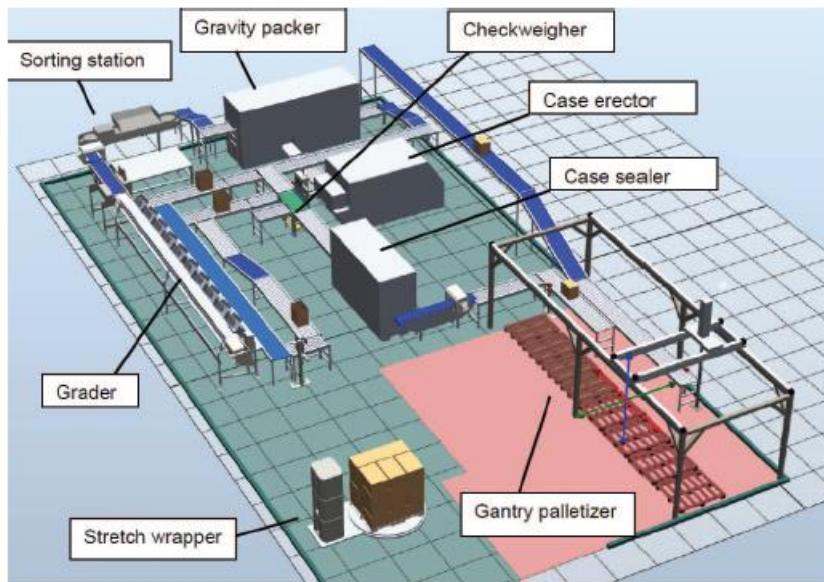


Figura 19 - Linha de Paletização Automatizada.

Fonte: (Kerezovic & Sziebig, 2016)

Antes desta proposta de solução, a linha era capaz de processar 260 caixas por hora, que resultava em 4.3 caixas por minuto. Com a solução automatizada a estimativa era de 18 a 20 caixas por minuto, que resultava em ganhos de 15.7 a 13.7 caixas por hora.

Os grandes armazéns e centros de distribuição da indústria também têm vindo a sentir uma grande necessidade de apostar em soluções de automação, muito devido a várias tendências nesse nicho de mercado de trabalho.

Em várias regiões dos Estados Unidos a população trabalhadora está a envelhecer rapidamente e dado que o tipo de trabalho de armazém é fisicamente exigente, o número de possíveis trabalhadores torna-se cada vez mais limitado (Sowinski, 2017). Ao mesmo tempo o número de nascimentos tem vindo a decrescer, que resulta em menos pessoas a entrarem no mercado de trabalho.

Outro fator chave para a crescente necessidade de soluções de automação é o aumento do custo laboral derivado de novos salários mínimos e o aumento de volume de negócios através do *e-commerce* (comércio online), onde as grandes empresas como a Amazon contratam milhares de trabalhadores de armazém e forçam outras a darem melhores condições para se manterem atrativas.

Posto isto, é claro para as empresas que faz todo o sentido tornarem-se o mais independente possíveis destas variabilidades, e como tal, tendem a investir em *software* e soluções mecanizadas, ou até mesmo armazéns 100% automáticos (Sowinski, 2017).

2.6.2 SISTEMAS WEB-BASED PARA CONTROLO E AUTOMAÇÃO

A evolução tecnológica leva a que haja cada vez mais convergência entre o mundo das Tecnologias de Informação e a Automação. São cada vez mais os casos de sucesso de aplicabilidade de TI em Automação.

Um caso de estudo onde foi utilizado um PLC como um servidor web permitiu monitorizar remotamente um processo físico (Kacur, Durdan, & Laciak, 2013).

Tirando partido das capacidades das tecnologias web, a monitorização pode ser feita de forma remota, em qualquer ponto do planeta desde que com acesso à internet. Neste caso, 2 processos físicos foram utilizados como objetivo para a monitorização remota: enrolamento de bobinas de aço e a gaseificação do carvão e em ambos foram monitorizados valores relativos à temperatura.

De uma forma resumida o sistema consistia em sensores de temperatura junto do processo físico (a uma distância de segurança e onde fossem garantidas todas as condições necessárias) e ligados ao PLC através de fio elétrico. No PLC constavam todas as variáveis relativas ao processo como as temperaturas, pressões, etc., e também uma página web (e servidor web) onde disponibilizavam esta informação. O PLC estava também ligado a um *router* que permitia a partilha da página web através do protocolo HTTP e também disponibilizava a informação a um cliente local através de uma aplicação *desktop* desenvolvida em Java.

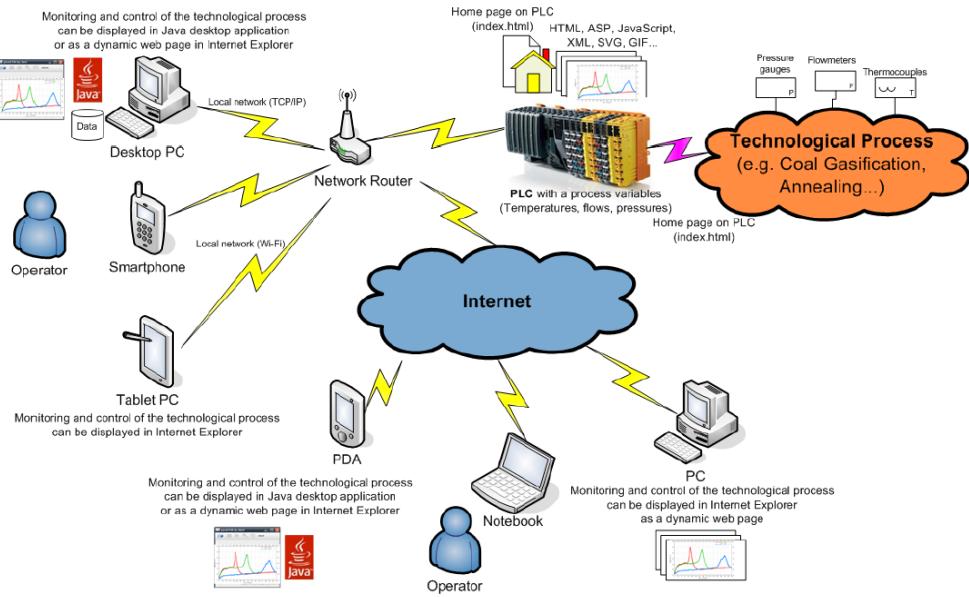


Figura 20 – Arquitetura para monitorização remota dos processos.

Fonte: (Kacur et al., 2013)

Na primeira abordagem, uma página web foi desenvolvida com as tecnologias HTML, ASP e Javascript. Esta era atualizada dinamicamente e para aceder à mesma de forma remota bastava um *browser* onde se colocava o endereço da página e conexão à internet.

Na segunda abordagem foi desenvolvida uma aplicação *desktop* em Java que permitia monitorizar diretamente as variáveis do processo. Aqui não era necessário o *browser* mas era necessário ter o Java instalado.

Como servidor web foi utilizado o que vem integrado no PLC do fabricante B&R e com a plataforma Automation Runtime SG4.

Desta forma foi possível monitorizar remotamente, coletar dados, processar dados coletados remotamente, configurar parâmetros do processo, etc.

O resultado da implementação da página web para monitorização do processo de enrolamento de bobinas de aço foi o da figura seguinte.

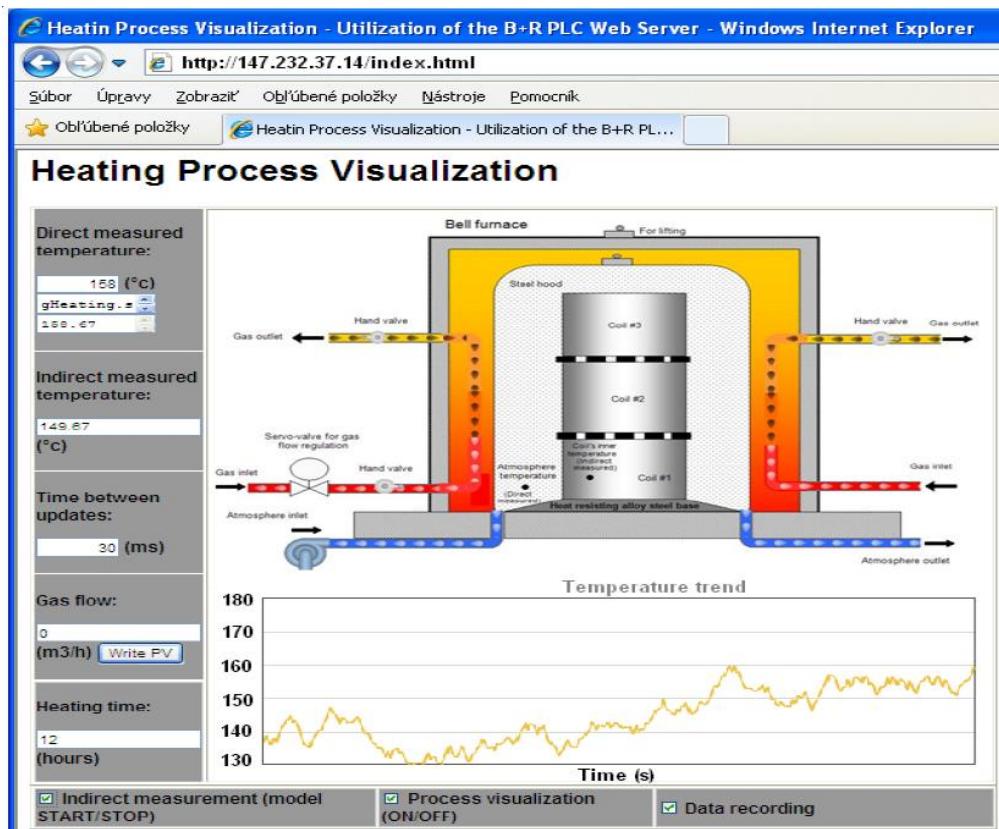


Figura 21 - Página web dinâmica para monitorização.

Fonte: (Kacur et al., 2013)

Esta abordagem permite acesso remoto via qualquer dispositivo que tivesse *browser* instalado, desde portáteis a *tablets* ou *smartphones*.

Para monitorização da temperatura do processo de gaseificação o resultado foi o da figura seguinte.

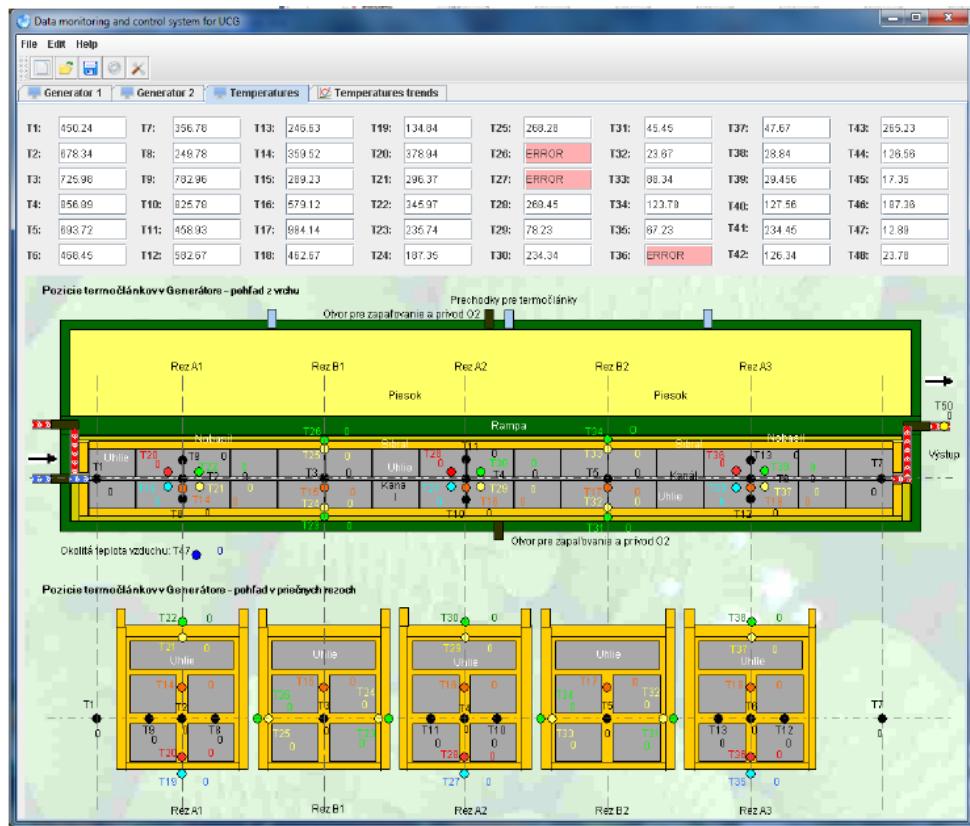


Figura 22 - Aplicação Java para monitorizar temperatura.

Fonte: (Kacur et al., 2013)

Como conclusão, o artigo refere que foram utilizadas duas abordagens distintas para monitorização de um processo físico remotamente, uma através da utilização do *browser* para acesso, outra através do desenvolvimento de uma aplicação *desktop* em Java. Ambas se revelaram um sucesso e podem ser estendidas à monitorização de outros processos físicos.

Outro caso de implementação de um sistema baseado na web para controlo e automação foi apresentado numa conferência de Sistemas e Controlo (Bermudez-Ortega, Besada-Portas, Lopez-Orozco, Chacon, & de la Cruz, 2016), em que foi desenvolvido um sistema baseado em tecnologias web para controlo remoto de PLCs de um laboratório de controlo através de um *browser*.

O sistema consistia num PLC do fabricante Beckhoff com o *software* Twincat, que permitia executar experiências de controlo num laboratório. Como servidor web foi utilizado o Node.JS que tem uma implementação que permite conectividade ao Twincat e no *frontend* da aplicação páginas web com recurso à livraria Easy Javascript Simulations (EjsS).

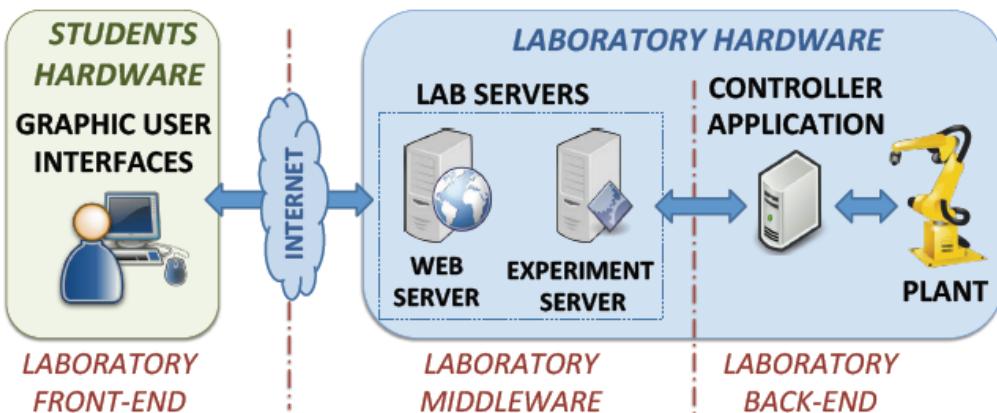


Figura 23 - Arquitetura do sistema para controlo remoto de laboratório.

Fonte: (Bermudez-Ortega et al., 2016)

O objetivo da implementação deste sistema passava por fornecer aos estudantes de uma universidade uma forma destes poderem realizar experiências de controlo a qualquer momento e a partir de qualquer localização que tenha acesso à internet, e também permitir que estes tivessem acesso mais frequentemente a equipamento real, incentivando-os a investir na aprendizagem. Além disto, o facto de o controlo ser remoto transmitia uma maior segurança porque algumas das experiências eram de natureza perigosa para a integridade física.

Uma das experiências utilizadas neste contexto foi o controlo de um Quanser Hover, que é um sistema com motor utilizado para controlo de quadricópteros, que por sua vez estava conectado fisicamente a um PLC do fabricante Beckhoff, com o software Twincat. Este *software* permite efetuar desenvolvimentos do ponto de vista da automação e controlo, e o Node.JS possui uma implementação que permite conectar ao mesmo e obter informação ou enviar informação para este.

Por sua vez o Node.JS fazia de servidor web e qualquer dispositivo com *browser* conseguia aceder a uma página HTML que permitia enviar e receber a informação do PLC.

O resultado desta experiência de controlo remoto foi o da figura abaixo.

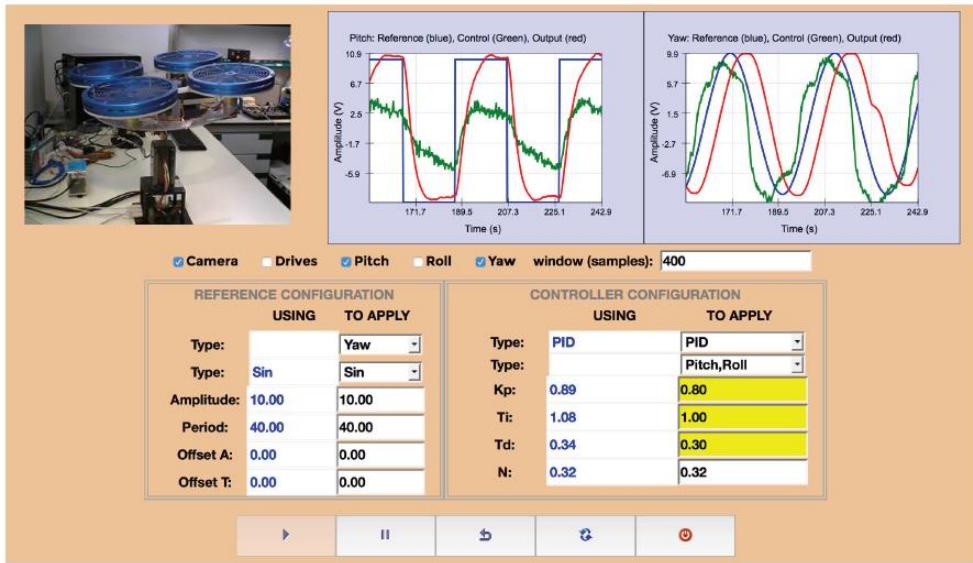


Figura 24 - Página no browser para controlo remoto.

Fonte: (Bermudez-Ortega et al., 2016)

Como conclusão o artigo refere que o objetivo de realizar experiências de controlo remotamente foi atingido com sucesso e o servidor web Node.JS revelou ser robusto e leve o suficiente para este tipo de aplicabilidade.

Outro caso relevante para o tema e que vai um pouco de encontro ao caso anterior, foi apresentado na segunda conferência internacional de Engenharia de Automação e Controlo de Mecânica (Li & Zhang, 2011), onde foi desenvolvida uma solução para realizar experiências remotas de controlo num PLC.

O sistema desenvolvido incluía um manipulador pneumático como objeto de controlo, ligado ao PLC (modelo S7-224 PLC do fabricante Siemens). Este continha uma placa de rede e estava ligado por *ethernet* a um servidor com sistema operativo Windows 2000 e com o software STEP7-Micro/WIN32 instalado. Este *software* é também do fabricante Siemens e serve para efeitos de desenvolvimento de projetos de automação.

O servidor por sua vez estava conectado a um *hub* de rede que permitia acesso remoto por clientes na rede interna e na internet.

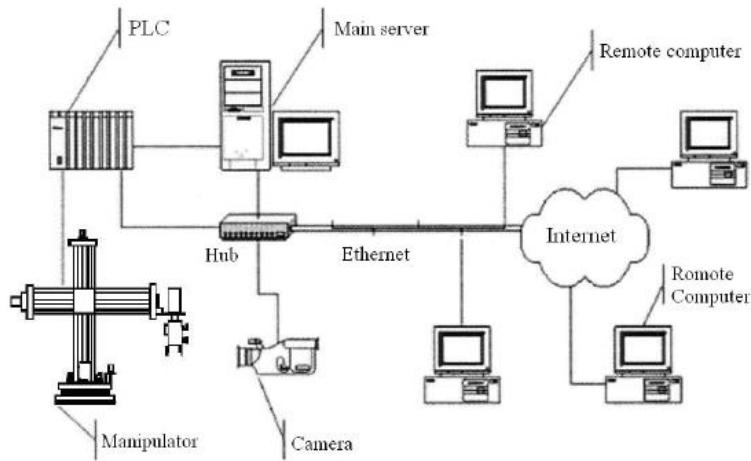


Figura 25 - Arquitetura do sistema para controlo de PLC remotamente.

Fonte: (Li & Zhang, 2011)

O servidor tinha instalado um servidor web onde alojava as páginas HTML e os Java Applets (*scripts* escritos em Java que correm no *browser*) e disponibilizava acesso através do protocolo HTTP.

O resultado da página web que monitorizava variáveis do PLC foi o da Figura seguinte.

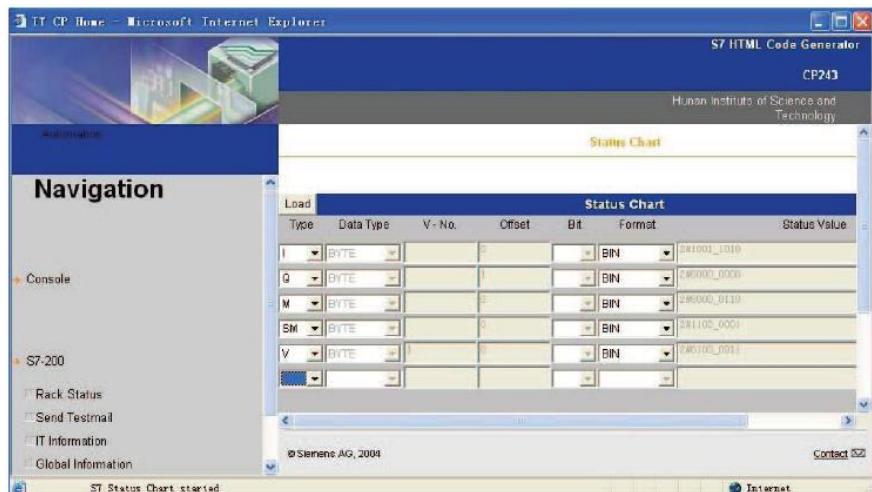


Figura 26 - Página web para controlo das variáveis do PLC.

Fonte: (Li & Zhang, 2011)

Em jeito de conclusão é referido no artigo que criar um laboratório para controlo remoto através da web é possível, assim como utilizar Javascript para atualização dinâmica da página web que monitoriza as variáveis do PLC, e ainda que foi detetada alguma demora na transmissão dos dados, ou seja, utilizando estas tecnologias o sistema necessitava de ser

otimizado. Finalmente o artigo refere também que métodos para controlo experimental remoto estão em investigação, que poderão trazer muito valor a aplicações industriais, investigação científica e educação à distância.

Parte do projeto a que me propus desenvolver está relacionado com o tema “Fabrico Aditivo” (ou Impressão 3D), ainda que aplicado num contexto industrial. Posto isto, é relevante mencionar que já existem atualmente sistemas web-based para monitorização, e até certo ponto, controlo, de impressoras 3D, como é o caso do sistema fornecido pela Markforged (<https://markforged.com>).

A Markforged é um fabricante de impressoras 3D que são capazes de trabalhar com vários tipos de materiais e com vários fins de aplicabilidade. Têm vários modelos de impressoras com características diferentes, no entanto todas são acessíveis fora de contexto industrial, quer pelo ponto de vista do tamanho das mesmas, quer pelos preços.

A aquisição de uma impressora da Markforged traz também anexado um *software* web-based, o “Eiger”, que permite monitorizar e controlar parcialmente a impressora.

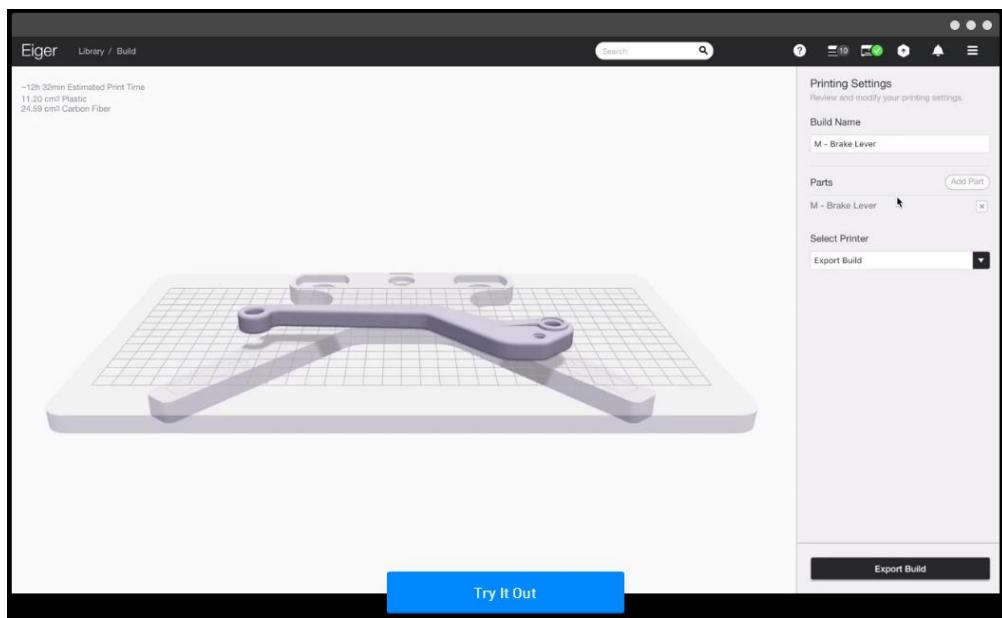


Figura 27 - Software Eiger.

Fonte: <https://markforged.com/eiger/>

O “Eiger” fornece funcionalidades interessantes como:

- Acesso através de qualquer dispositivo com um *browser*
- Permite importar desenhos de peças remotamente para serem impressas
- Permite visualizar as camadas da impressão

- Permite alterar características da peça, como dimensões, posicionamento, material, etc.
- Permite monitorizar parâmetros da impressão em tempo real
- Permite armazenar e visualizar peças anteriormente impressas
- Fornece visualizar uma peça em 3D e 2D
- Entre outras

Na tabela seguinte consta uma comparação com pontos relevantes sobre aspectos técnicos/funcionais utilizados nos artigos/casos mencionados neste tópico.

Artigo/Caso	Tecnologias	Interação Remota	Monitorização Tempo Real	Controlo Tempo Real	Visualização de peças	Visualização de Histórico	Processo Monitorizado/Controlado
Kacur, Durdan, & Laciak, 2013	HTML, ASP, Javascript	Sim	Sim	Sim	N/A	Não	Temperatura na Gaseificação do Carvão
Kacur, Durdan, & Laciak, 2013	Java	Sim	Sim	Sim	N/A	Não	Temperatura no Enrolamento de Bobinas de Aço
Bermudez-Ortega et al., 2016	NodeJS,HTML, Javascript, Easy Javascript Simulations	Sim	Sim	Sim	N/A	Não	Controlo e execução de experiências de laboratório
Li & Zhang, 2011	HTML, Javascript, Java Applets	Sim	Sim	Sim	N/A	Não	Controlo e execução de experiências de laboratório
Eiger	N/A	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Impressão de Peças

Tabela 1 - Características dos artigos e casos descritos

2.6.3 REALIDADE AUMENTADA NA INDÚSTRIA

Com a evolução e maturação da Realidade Aumentada, era expectável que esta começasse a ser aposta para integração com o mais variado tipo de sistemas e aplicabilidades, pois os benefícios que daí podiam surgir eram imensos.

Exemplo dessa aposta é um artigo publicado sobre um sistema para design 3D apoiado por Realidade Aumentada (Aoki, Mitani, Kanamori, & Fukui, 2015).

Dado que nos últimos anos as impressoras 3D atraíram muita atenção devido à sua capacidade e facilidade de transportar para a realidade uma peça 3D desenhada num *software* apropriado e também devido à tendência dos preços se tornarem cada vez mais acessíveis aos consumidores mais comuns, novos problemas apareceram: o *software* convencional para criação de peças em 3D é complexo para quem não é especialista na área e muitas vezes as peças geradas pelos mesmos não estão em condições de serem impressas devido a falhas como a existência de buracos ou de interseções na superfície. Assim, o artigo descreve que o sistema desenvolvido utiliza Realidade Aumentada para simular as peças através da sincronização dos sistemas de coordenadas real e virtual com utilização de marcadores de Realidade Aumentada e de uns óculos específicos com um ecrã de Realidade Aumentada.

A interface de RA desenvolvida utilizou os óculos Vuzix STAR1200XL e o sistema foi implementado com a linguagem de programação C++ e com recurso à biblioteca gráfica OpenGL.

Foram utilizados dois tipos de marcadores de RA, um para determinar a posição e a orientação do objeto 3D que está a ser editado e outro para fornecer uma ferramenta de edição através de uma interface do tipo *air-spray* que permite editar a peça e de um rato sem fios. No fundo este tipo de interface permite editar para onde o marcador estiver a apontar, sendo assim semelhante a um *spray*.

O sistema fornece *feedback* visual ao utilizador através da alteração das cores para indicar funções da interface e o estado operacional.



Figura 28 - A interface do sistema através dos óculos e dos marcadores de RA.

Fonte: (Aoki et al., 2015)

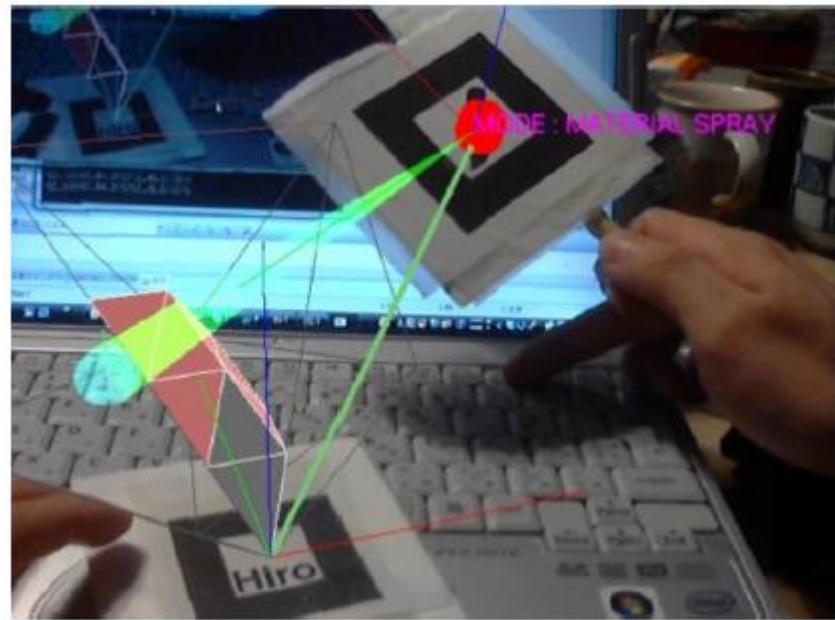


Figura 29 - Uma peça a ser modelada. Material virtual é "despejado" do spray na mão direita.

Fonte: (Aoki et al., 2015)

Resultados de peças criadas a partir do sistema descrito podem ser vistos na Figura seguinte.

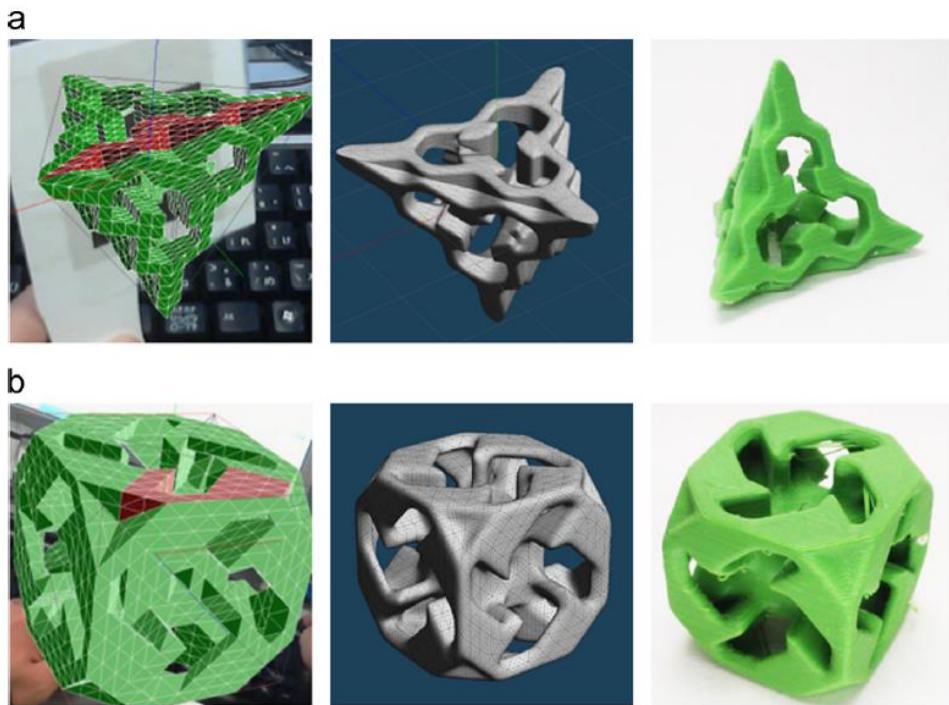


Figura 30 - À esquerda a peça em RA, ao centro a peça em software de modelação 3D e à direita a peça impressa.

Fonte: (Aoki et al., 2015)

Como conclusão o estudo refere que através dos resultados obtidos foi confirmado que é possível produzir ou imprimir uma grande variedade de formas com o apoio de uma interface de RA que funciona de uma forma idêntica a um *spray*, e que utiliza replicação para criar estruturas simétricas automaticamente. Assim, torna-se possível que utilizadores sem grandes competências do ponto de vista do desenvolvimento de peças 3D possam imprimir objetos 3D.

São vários os setores da indústria onde existem possíveis aplicações de Realidade Aumentada, por exemplo na indústria de fabrico mais concretamente nas linhas de produção, instruções gráficas de montagem e animações sequenciais podem ser previamente codificadas numa fase de design para conjuntos de procedimentos típicos (ver Figura seguinte). Estas sequencias podem ser reproduzidas virtualmente em produtos reais nas linhas de montagem, ajudando e formando os operadores de montagem. Esta abordagem traz claros benefícios como redução de tempo de montagem, reduzindo também tempo de entrega e margem de erro humano (Mehdi Mekni, 2014).



Figura 31 - Montagem de produto animada em ambiente de RA.

Fonte: (Mehdi Mekni, 2014)

Na indústria dos jogos e entretenimento também há casos de aplicabilidade de RA, tanto para criar jogos à volta de ambiente de RA, como por exemplo para fornecer vários detalhes sobre um determinado jogo a ser transmitido.

Um caso é o “Fox-Trax System” utilizado para realçar a localização de um disco de hóquei enquanto este se move rapidamente pelo ringue (Cavallaro, 1997).

Na indústria do turismo também há casos de aplicabilidade de RA, tal como o “The Archeoguide” que é um projeto de RA que visa fornecer informação arqueológica a visitantes de determinados locais considerados património mundial (Mehdi Mekni, 2014).

Na Engenharia Civil e Planeamento Urbano pode ajudar na tomada de decisões e visualização de edifícios de forma virtual em cenários reais, como por exemplo o “A4D” (Capo, A.J., Carreras, J., Dias, J.M., Galli, R., & Gamito, 2003).

Neste momento há muitas possíveis direções que a Realidade Aumentada pode tomar dentro dos vários contextos, no entanto é possível identificar alguns fatores que serão desafios dos sistemas de Realidade Aumentada nas várias aplicabilidades: os acessórios (como luvas, óculos, etc.) podem tornar-se limitações dos sistemas e necessitam de ser mais leves, pequenos e fáceis de utilizar, o próprio *hardware* pode necessitar de evoluir de forma a ter capacidade computacional suficiente para tornar os sistemas fluídos, a deteção de obstruções, entre outros.

3. DESENVOLVIMENTO DE PROPOSTA DE SOLUÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Após estar identificado o problema, consequentes necessidades a suprir e feito um exaustivo estudo de Estado da Arte que permitiu introduzir conceitos e avaliar trabalhos relacionados com o tema, desenvolveu-se uma primeira proposta de solução baseada num protótipo funcional, com o intuito de replicar as condições físicas (do utilizador e do *hardware*) e tecnológicas da solução final. Em relação às condições físicas do utilizador, importa registar que o mesmo se encontra com as duas mãos livres durante todo o processo de operação do equipamento e que não é expectável que se encontre com luvas calçadas, isto é, nada o impedirá/restringirá no manuseamento da HMI da forma mais eficaz. Já sobre as condições de *hardware*, importa referir que do ponto de vista da solução de automação estava restringido a equipamento do fabricante Beckhoff (*Hardware* e *Software* de Automação).

Desta forma, considerando os objetivos de alto nível traçados foi então construído um protótipo funcional, que serve de validação das tecnologias e da arquitetura adotada, que consiste numa HMI *Web-based* que permite monitorizar e controlar parâmetros de um equipamento de fabrico aditivo em tempo real e foram também traçados sub-objetivos para a fase de desenvolvimento do projeto.

3.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

O protótipo funcional foi desenvolvido recorrendo a um equipamento de fabrico aditivo disponível no âmbito de outro projeto no INEGI e que se encontrava num estado avançado de desenvolvimento do ponto de vista de automação, isto é, a própria solução já estava num estado mais maduro, que gerava poucos erros de automação e que por sua vez resultava em pouco “ruído” para as camadas de *software* a desenvolver no protótipo, e que pelo facto de utilizar as mesmas tecnologias de *software* e *hardware* que o projeto que envolve esta tese permitia criar um ambiente bastante semelhante ao que a HMI final iria encontrar. Este equipamento surgiu com o intuito de estudar o fabrico de meios de produção (moldes/moldações) e modelos sobretudo com gesso, areia de sílica e resina termoendurecível, ideia que surgiu da necessidade identificada juntos das empresas fornecedoras de peças e componentes em materiais metálicos fundidos, materiais cerâmicos

e materiais compósitos, as quais são cada vez mais solicitadas para séries mais curtas e para componentes mais complexos e de grande dimensão.



Figura 32 - Equipamento utilizado para o protótipo funcional



Figura 33 - Equipamento em funcionamento



Figura 34 - Equipamento a depositar gesso, criando uma peça

Por sua vez, a HMI final resultante desta tese assenta num equipamento de fabrico aditivo e respetivas tecnologias recentes com a consequente aplicação para além do estado da arte em materiais termoplásticos para aplicações de alta temperatura e resistência cujas propriedades podem introduzir inúmeros desafios que requerem o apoio de tecnologias para controlo e monitorização do processo. Este equipamento encontra-se atualmente em fase de desenvolvimento do ponto de vista de automação, tendo sido recentemente realizados os primeiros testes de impressão de peças com os respetivos materiais. As imagens seguintes são respetivas ao mesmo.



Figura 35 - Estrutura da área de impressão do equipamento final



Figura 36 - Equipamento de Fabrico Aditivo e a HMI

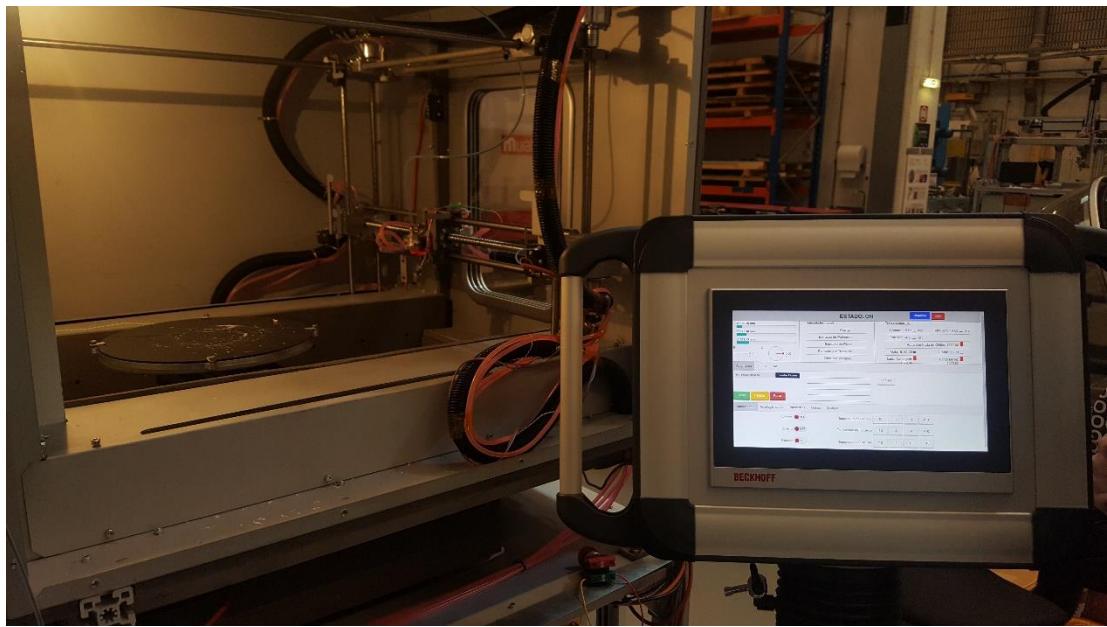


Figura 37 - Equipamento de Fabrico Aditivo e a HMI

Os equipamentos dedicados ao Fabrico Aditivo têm, normalmente, a capacidade de interpretar e executar Código G, pois é este que contém as instruções para os movimentos dos eixos e respetiva impressão de peça camada a camada. O código G (também conhecido como a própria tradução para inglês *G-Code*) é o nome mais comum atribuído à linguagem de programação para sistemas de controlo numérico (NC). É uma linguagem baseada em comandos sequenciais (linha a linha) que contém a informação necessária para que um determinado trabalho seja executado com sucesso e pode envolver diversos tipos de operações como movimentação de eixos, alteração de atributos ou parâmetros que por sua vez poderão despoletar determinadas ações como aumento de velocidades, variações em temperaturas, etc.. Pode-se afirmar que de uma forma geral o código G pretende instruir o equipamento a mover-se geometricamente nas dimensões X, Y e Z, e pode ainda conter outros parâmetros que permitem executar outras funções. A versatilidade do código G permite ainda que o utilizador crie uma determinada função no equipamento, e que essa mesma função fique associada a um letra e a um número que quando aparecerem numa linha de código G irão despoletar a função, por exemplo o utilizador poderia criar uma função “M54” na própria solução de automação que serviria para multiplicar um valor passado por parâmetro por todos os valores respetivos a temperaturas (imaginando que o equipamento controlava vários pontos de temperatura), e assim que aparecesse uma linha de código G “M54 5”, todos os pontos de temperatura seriam multiplicados por 5. Desta

forma é possível perceber que o código G é uma linguagem adaptável a vários contextos. A figura abaixo demonstra um excerto de código G na impressão de uma peça.

```
N1      G53
N2      G74 X2 Z1
N3      G01 Z15 F500
N4      G74 Y1 B2 ; home all axes
N5      G54
N6      G01 X200 Y0 Z50 B0 C0 F400
N7      M61=2500 ; turn on heated extruder 1
N8      M51=11000 ; turn on heated bed|
N9      M40 ;wait for temperatures to settle
N10     G92 AV.A.ACT_POS.A
N11     G01 A-2.0000 F2400.0000 ; retract
N12
N13     G01 X17.189 Y27.461 F3600.000 ; move to first skirt point
N14     G01 Z0.350 F3600.000 ; move to next layer (0)
N15
N16     G01 A0.0000 F2400.0000 ; unretract
N17     G01 X15.951 Y28.198 A0.09433 F900.000 ; skirt
N18     G01 X14.453 Y28.995 A0.20536 ; skirt
N19     G01 X12.916 Y29.711 A0.31641 ; skirt
N20     G01 X11.343 Y30.347 A0.42745 ; skirt
N21     G01 X10.282 Y30.722 A0.50113 ; skirt
N22     G01 X8.660 Y31.218 A0.61216 ; skirt
N23     G01 X7.015 Y31.629 A0.72320 ; skirt
N24     G01 X5.372 Y31.949 A0.83278 ; skirt
N25     G01 X3.946 Y32.156 A0.92711 ; skirt
N26     G01 X2.257 Y32.319 A1.03815 ; skirt
N27     G01 X0.563 Y32.392 A1.14918 ; skirt
N28     G01 X-0.563 Y32.392 A1.22287 ; skirt
N29     G01 X-2.235 Y32.320 A1.33245 ; skirt
N30     G01 X-3.670 Y32.189 A1.42678 ; skirt
N31     G01 X-5.350 Y31.953 A1.53782 ; skirt
N32     G01 X-7.015 Y31.629 A1.64885 ; skirt
N33     G01 X-8.660 Y31.218 A1.75990 ; skirt
N34     G01 X-9.740 Y30.899 A1.83359 ; skirt
N35     G01 X-11.343 Y30.347 A1.94461 ; skirt
```

Figura 38 - Exemplo de código G

No contexto deste projeto está definido que nas instruções de código G o “X”, “Y” e “Z” dizem respeito às próprias dimensões X,Y e Z, o “A” serve para indicar o extrusor, o “G” representa as funções pré-definidas pelo CNC (por exemplo “G01” diz respeito a uma interpolação linear, “G02” a uma interpolação circular, entre outras), o “M” é para funções definidas pelo utilizador, o “P” é para parâmetros definidos pelo utilizador (por exemplo “P1” tem o valor 20, e se numa linha de código G aparecer X50+P1 o eixo X deve considerar o valor do parâmetro “P1”) e o “F” é para velocidade de interpolação.

3.2 SUB-OBJETIVOS

Estão definidos dois grandes objetivos a atingir com o desenvolvimento do projeto: desenvolver uma HMI *Web-Based* e poder controlar e monitorizar parâmetros do equipamento e do processo em tempo real.

Partindo deste princípio foram definidos subobjetivos para o projeto, que no fundo representam tarefas a executar, apesar de nem todos serem de carácter obrigatório e estarem dependentes de nuances que possam aparecer com o decorrer do desenvolvimento. Os subobjetivos são os seguintes:

- Módulo de controlo básico do equipamento: ligar, desligar, pausar equipamento, parar equipamento, monitorizar posição dos eixos e estado geral do equipamento
- Fornecer vários modos de operação: manual, automático, bloco a bloco
- Monitorizar parâmetros do processo em tempo real (velocidade de extrusão, temperatura em vários pontos, etc.)
- Importar remotamente e executar Gcode
- Visualizar Gcode a ser executado em tempo real
- Recolha e armazenamento de dados das impressões
- Visualização de histórico de impressões
- Visualização da peça em 3D através do Gcode
- Módulo de Realidade Aumentada para visualização da peça a ser impressa

3.3 ARQUITETURA DO PROTÓTIPO

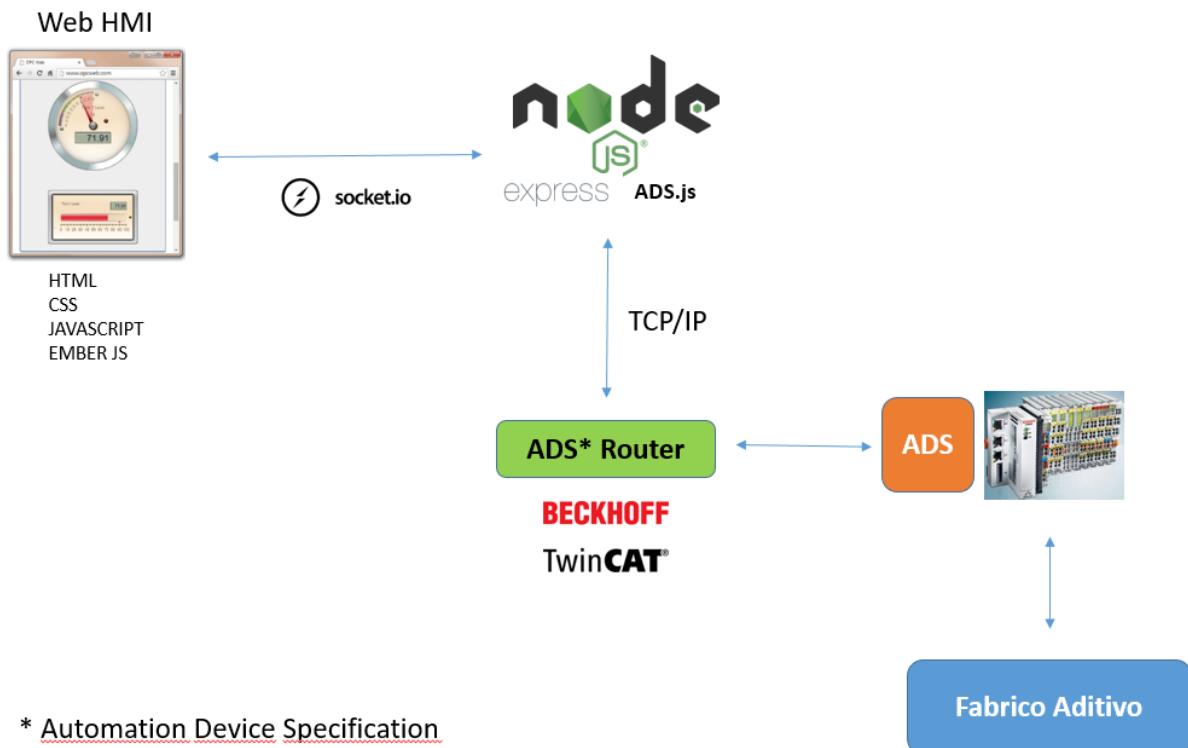


Figura 39 - Arquitetura do Protótipo

A arquitetura do protótipo assenta em 3 camadas de *software* mais uma de *hardware* que controla e monitoriza o processo físico em si, que neste caso é o Fábrico Aditivo, formando um total de 4 camadas distintas.

As camadas de *software* consistem no cliente/utilizador, o servidor web e o *software* de automação.

O cliente acede ao sistema através de um *web browser* e obtém a página HTML que corresponde à HMI. Para além do HTML, a página web carregada traz acoplado também ficheiros CSS, Javascript e Ember JS. Este último é uma *framework* para criação de interfaces web desenvolvida em Javascript.

A comunicação entre esta camada e o servidor web é efetuada através de Socket.IO que consiste numa tecnologia de comunicação bidirecional em tempo real baseada em eventos.

O servidor web foi desenvolvido no NodeJS e recorrendo aos *plugins* express.js e ADS.js. Este último permite comunicação com o *software* de automação Twincat via TCP/IP.

O *software* de automação é o Twincat do fabricante Beckhoff e este permite desenvolver soluções de automação, assim como comunicar com dispositivos de *hardware* que estejam conectados ao sistema, como *drives* de motor, PLCs, canais de *input/output*, etc. Este *software* possui uma arquitetura modular que permite tratar cada módulo (composto por *software* e possivelmente dispositivo de *hardware*) como um dispositivo independente. As mensagens entre os módulos tornam-se possíveis através de uma interface ADS (Automation Device Specification) que cada módulo tem e através do “ADS Router” existente no *software* que gera e consegue identificar os destinatários das mensagens. Isto, na prática significa que quando chega um envio de uma mensagem remota, o “ADS Router” consegue identificar para qual módulo/dispositivo esta mensagem se dirige.

Por último temos a camada de *hardware* e dos diferentes tipos de dispositivos que podem controlar e monitorizar o processo físico.

3.4 PROTÓTIPO FUNCIONAL

Este protótipo possui um conjunto de funcionalidades que permitem controlar e monitorizar o equipamento e parâmetros do processo, tais como a monitorização do estado da máquina (pode variar entre *on/off*, pause, auto ou manual), envio dos eixos para uma determinada posição, envio de ficheiro Gcode para o equipamento interpretar e executar, pausar o equipamento, abortar a execução de um ficheiro Gcode, visualizar as linhas de Gcode que estão a ser executadas em tempo real, acompanhar a posição dos eixos em tempo real e visualizar o desenho da peça em 2D e 3D.

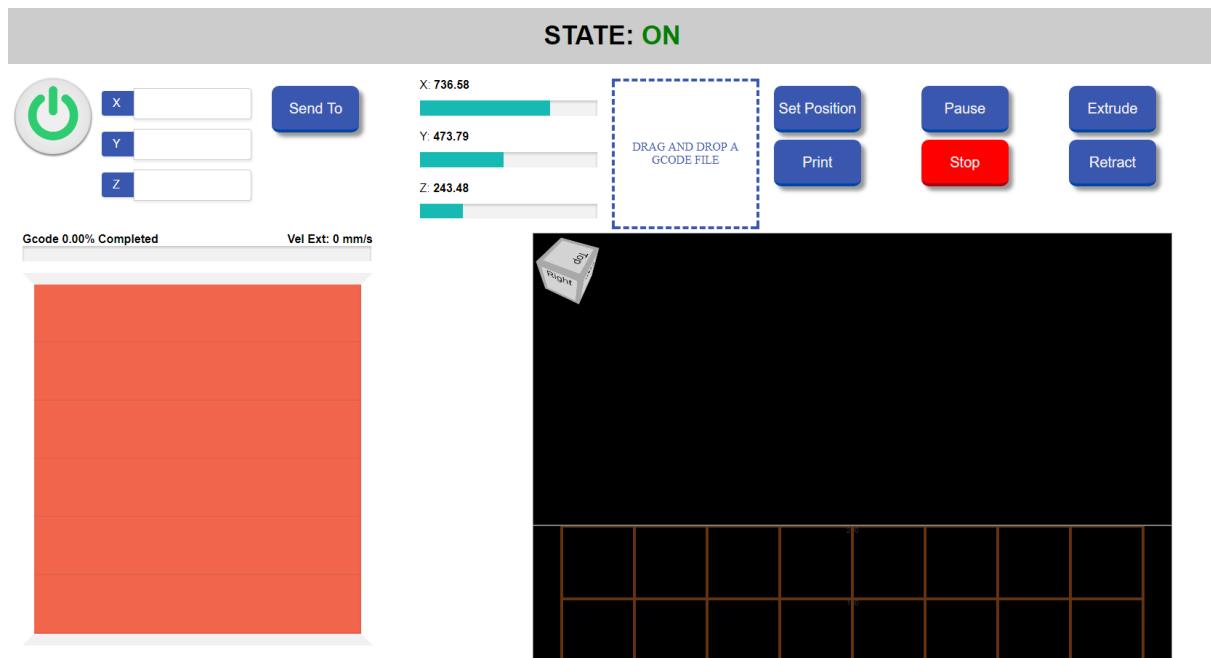


Figura 40 - Sistema com o equipamento ligado e em estado ON

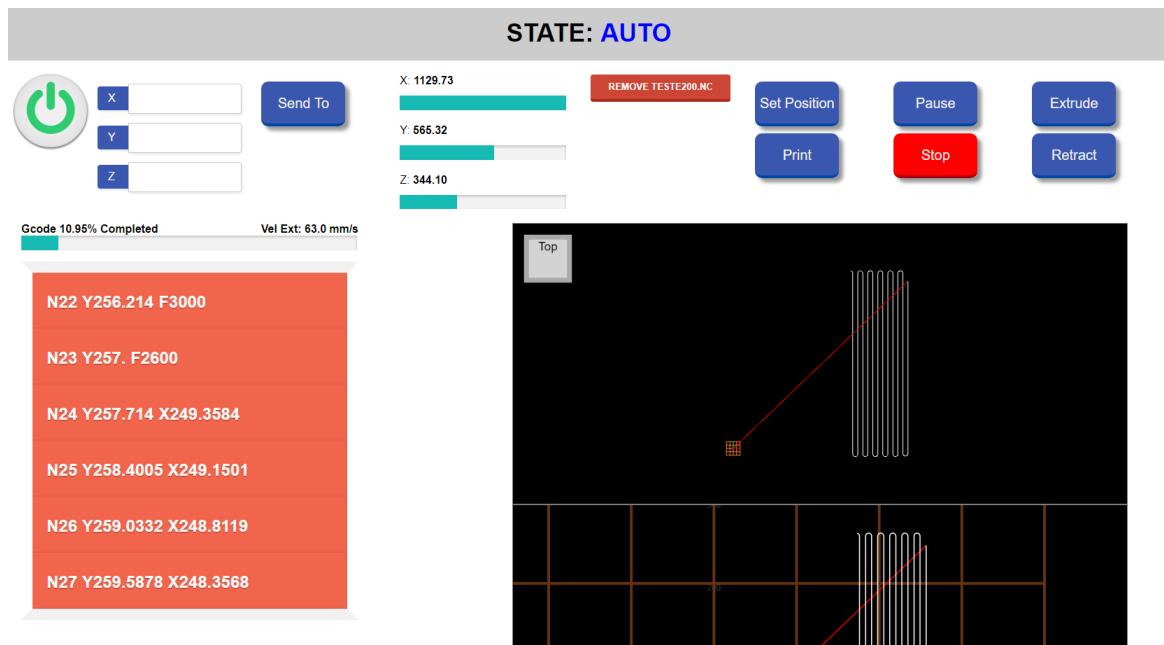


Figura 41 - Sistema a executar o Gcode na tabela vermelha

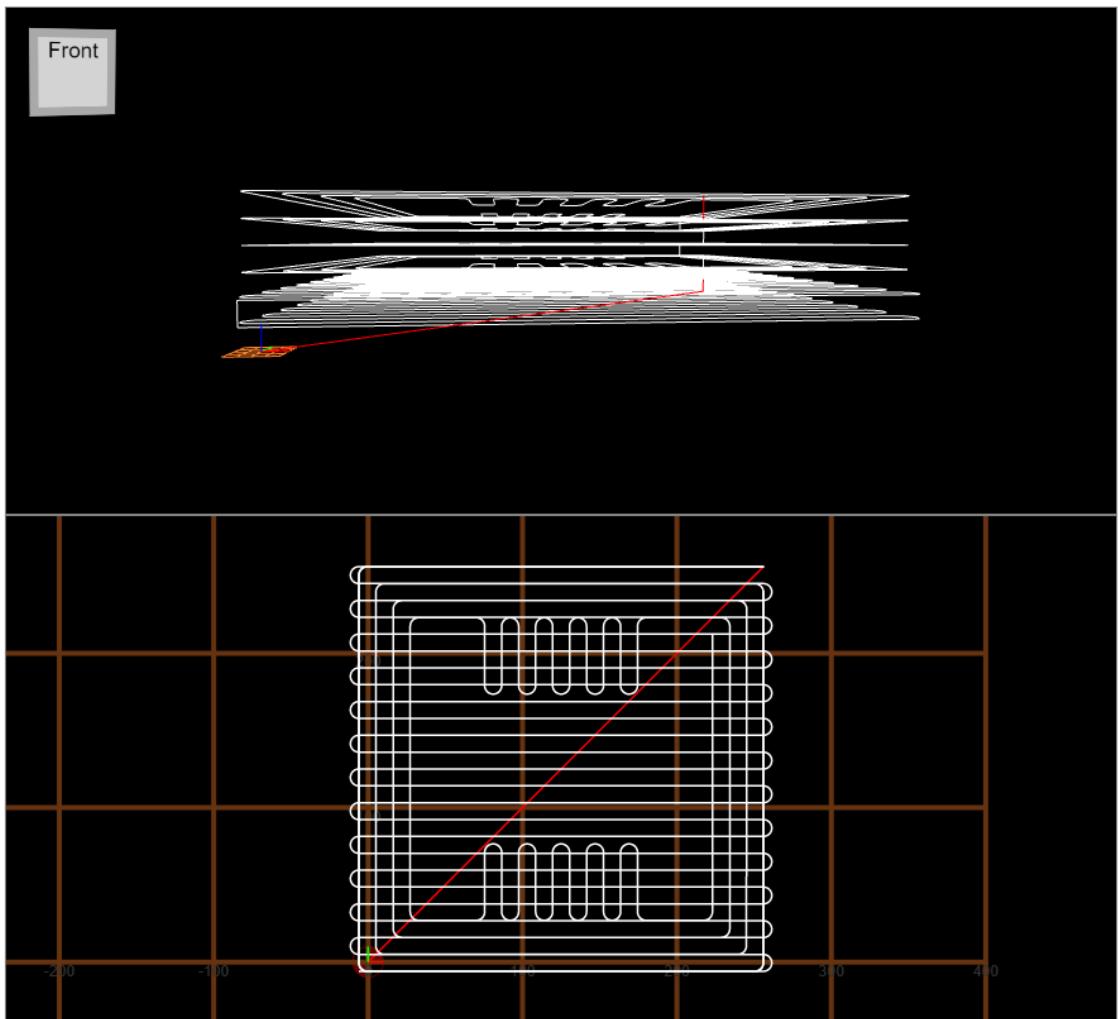


Figura 42 - Visualização da peça a ser impressa em 3D (cima) e 2D (baixo)

3.4 CONCLUSÕES

Após ter sido levantado o problema e estudado um conjunto de tecnologias relacionadas com uma possível solução para o problema, tornou-se fundamental ter uma prova de conceito prática que servisse de alavanca ao projeto e para tal foi desenvolvido um protótipo funcional.

O protótipo desenvolvido permitiu fazer uma primeira implementação e validar a arquitetura e as tecnologias consideradas para o sistema final, num equipamento real, dando assim um conhecimento mais realista e palpável dos seus comportamentos, formas de comunicação, interação entre as tecnologias, etc., e fazendo uma primeira aproximação à realidade que seriaposta em prática no desenvolvimento do sistema final.

Sem preocupações ainda sobre usabilidade ou requisitos que dessem resposta a necessidades dos utilizadores, o grande foco do protótipo foi desenvolver um sistema utilizando um conjunto de tecnologias estudadas, assim como analisar o seu comportamento quando integradas e a trocar informação entre elas. Posto isto, o objetivo foi atingido com sucesso e serviu de base para o desenvolvimento do sistema final.

4. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO FINAL

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será descrito o processo de desenvolvimento da solução final. Os capítulos anteriores permitiram explorar linhas de investigação sobre conceitos e temas relacionados e validar a arquitetura definida para a implementação do projeto, lançando as bases necessárias para a etapa de desenvolvimento.

4.2 ANÁLISE DE REQUISITOS E DESENVOLVIMENTO DE MAQUETE

Um dos primeiros passos no desenvolvimento de um *software* é, normalmente, fazer a análise dos requisitos para o projeto em questão. Um requisito de *software* é uma condição ou restrição sobre o sistema e existem vários tipos de requisitos.

Esta é uma fase importante no ciclo de vida de cada projeto porque um requisito errado/incompleto/inexistente pode significar problemas graves no projeto, como por exemplo falhas em prazos de entrega e stress nas equipas de desenvolvimento, assim como nos clientes, que por sua vez gera um descontentamento transversal.

Os principais objetivos da análise de requisitos podem-se resumir em compreender o problema e identificar as necessidades do projeto, e como resultado da análise fica definido um conjunto de requisitos como especificações a serem implementadas, onde são descritos os comportamentos, as propriedades e os atributos expectáveis e que devem refletir as necessidades das partes interessadas no projeto (Ferreira, 2010, p.25).

Assim, foi feito um levantamento de requisitos junto de um grupo de utilizadores da HMI, ficando os mesmos registados num ficheiro MS Excel (ver duas figuras abaixo) e categorizados em dois grandes grupos, “Informativos” e “Funcionais”, e ainda um último grupo, o “Complementar”, que tinha uma funcionalidade menos relevante, mas também de razoável interesse.

Funcionalidade	Detalhes	Tipo
Ver Posições dos Eixos	Posição Eixo X Posição Eixo Y Posição Eixo Z Posição Eixo B Posição Eixo C	Informativo
Ver velocidades de trabalho	Avanço Velocidade de Extrusão de Polímero Velocidade de Extrusão de Fibra Polímero extrudido por trabalho ? Fibra extrudida por trabalho ?	Informativo
Visualizar Dados de Temperatura	Temperatura da Câmara* (atual/desejada) Temperatura do Tabuleiro (atual/desejada) Temperatura do Extrusor (atual/desejada) Temperatura da água à entrada do Chiller Temperatura do motor B Temperatura do Quadro Temperatura da saída de Cablagem Temperatura "ponto móvel"	Informativo
Controlo do sistema de aquecimento	Aquecimento da Câmara (On/Off) Aquecimento do Tabuleiro (On/Off) Aquecimento do Extrusor (On/Off) Definir Temperatura da Câmara Definir Temperatura do Tabuleiro Definir Temperatura do Extrusor	Funcional
Controlo do sistema de insuflação de ar	Ventilação da câmara (On/Off) Ventilação do eixo x e Cablagem (On/Off) Ventilação do Quadro (0/50%/100%)	Funcional
Modo de Operação (Alterável)	Automatico Manual MDI	Funcional

Figura 43 - Levantamento de Requisitos (1ªparte)

Funcionalidade	Detalhes	Tipo
Comandos de Execução Automatica	Importar ficheiro de código Iniciar Pausa Parar Homing Geral Homing de um eixo selecionado	Funcional
Comandos de Execução MDI	Executar comando Pausa Parar	Funcional
Comandos de Execução Manual	Escolher Eixo Definir Quantidade de Avanço/Recuo** Avançar + Avançar - Avançar Extrusor Recuar Extrusor	Funcional
Controlo de parâmetros do equipamento	Velocidade de Avanço*** Velocidade de Extrusão de Polímero Velocidade de Extrusão de Fibra	Funcional
Ajuste da Mesa de Impressão	Procedimento de Ajuste da Mesa?	Funcional
Visualizar Histórico de Execuções	Log de Parâmetros Supracitados	Informativo
Comandos de Execução Manual	Desligar Tudo Desligar todo o Sistema de Aquecimento Desligar Câmara (Aquecimento + Ventilação) Desligar Motores	Funcional
Opções Secundárias	Illuminação da Câmara (On/Off)	Complementar

Figura 44 - Levantamento de Requisitos (2ªparte)

O passo seguinte foi desenvolver um conjunto de maquetes que refletem a primeira versão dos ecrãs da HMI e que dão resposta à lista de requisitos recolhida junto dos utilizadores.

O desenvolvimento de maquetes é uma estratégia que permite facilitar o entendimento dos requisitos entre todas as partes envolvidas, apresentando conceitos e funcionalidades do *software*. Existem várias abordagens para desenvolver maquetes, isto é, podem ser de baixa fidelidade, sem interação do ecrã, mas que permitem rápidos ajustes ou alterações consoante *feedback* recolhido, assim como podem ser maquetes complexas e interativas que representam de forma muito próxima o *software* a desenvolver, mas que tem como contrapartida o facto de as alterações ou ajustes necessários serem mais demorados a efetuar.

A abordagem seguida foi a de, numa primeira fase, criar maquetes que visualmente tinham uma representação o mais próximo possível da HMI final, mas que eram estáticas. Para tal foi utilizada uma ferramenta web especializada na criação de maquetes estáticas (<https://moqups.com/>) e o resultado foi o que se pode verificar nas figuras abaixo.



Figura 45 - Maquete da máquina ligada e tabs Automático e Aquecimento visíveis

O desenho das primeiras maquetes obrigou a uma análise e reflexão acerca da forma como a informação estaria organizada e disponibilizada na interface, assim como todas as funcionalidades disponíveis para o utilizador. Para tal, foi essencial discutir com os potenciais utilizadores da interface e operadores do equipamento de fabrico aditivo para compreender as prioridades na organização da informação e funcionalidades. O que resultou da discussão foi o primeiro desenho (ver figura acima), onde se pode ver que na zona superior do ecrã constam três grupos de informação que está a ser atualizada em tempo real, relativa à posição dos eixos, às velocidades de impressão e às temperaturas em vários pontos do processo. Este é o conjunto de informação mais crítico e que deve constar numa zona de rápida visibilidade para o utilizador. De seguida vêm zonas de interação com o utilizador, nomeadamente os modos de operação Automático, Manual e MDI, onde no primeiro, o Automático, é permitido executar e controlar a execução de um ficheiro de

código G (linguagem de programação para controlo numérico e que é normalmente utilizada para controlo automático de máquinas na indústria), no Manual é permitido controlar e operar cada eixo de forma manual e individual e no MDI é permitido executar um comando de código G. Por último, na zona inferior do ecrã pode-se ver um conjunto de *tabs* que permitem controlo de alguns parâmetros relativos ao processo de impressão e também ao equipamento em si. A primeira *tab*, Aquecimento, permite controlar parâmetros relativos ao sistema de aquecimento do equipamento, como o aquecimento da câmara, do tabuleiro ou do extrusor, assim como simplesmente efetuar variações nas temperaturas dos mesmos. A *tab* da Insuflação de Ar permite controlar a insuflação de ar da câmara, do eixo X e cablagem e também do quadro. A *tab* Parâmetros permite ajustar as velocidades de avanço, de extrusão de polímero e de extrusão de fibra. A *tab* Outros permite correr uma função de ajuste da mesa e controlar a iluminação da câmara. A última *tab* permite desligar componentes do equipamento como os motores, o sistema de aquecimento, o aquecimento da câmara e todo o equipamento. As figuras seguintes dizem respeito às maquetes criadas para as funcionalidades descritas.



Figura 46 - Maquete da máquina em pausa e *tabs* Manual e Insuflação de Ar visíveis



Figura 47 - Maquete da máquina desligada e tabs MDI e Parâmetros visíveis

Após a criação da primeira versão estática das maquetes, foi criada uma segunda versão. Esta versão permitia interatividade, isto é, permitiam navegar entre ecrãs e tabs da HMI, de forma a que fosse possível simular a execução de todas as tarefas. De referir ainda que estas respeitavam o tamanho do ecrã tátil que será utilizado no equipamento real de fabrico aditivo e foram criadas com recurso a uma ferramenta web (<https://proto.io/>) que permitiu exportar um protótipo em HTML e assim tornou possível a execução do mesmo no *browser* e consequente navegação entre ecrãs (ver imagens seguintes).

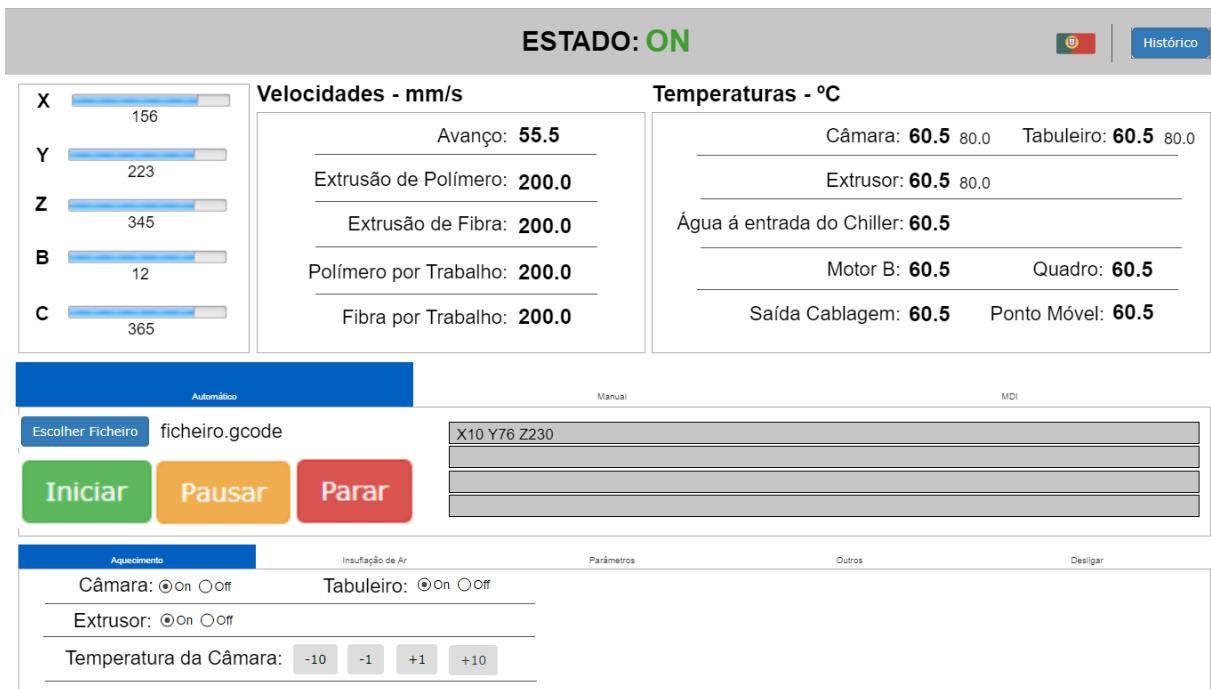


Figura 48 - Protótipo interativo em modo automático



Figura 49 - Protótipo interativo em modo manual



Figura 50 - Protótipo interativo em modo MDI

Entre esta versão de maquetes e a primeira houve alguns ajustes feitos derivados de análise e reflexão feita às necessidades em conjunto com a forma como as funcionalidades estavam dispostas, nomeadamente na tab Manual o método de seleção dos eixos, agora com um botão para cada eixo e também um botão para cada valor de velocidade a incrementar/decrementar, solução que acabou por permanecer na versão final da interface.

4.2 ARQUITETURA FINAL

Ao longo dos anos as tecnologias web cresceram e evoluíram nas várias vertentes, sendo uma delas o lado cliente que permite que hoje em dia existam aplicações com um elevado nível de complexidade e ainda assim com idêntico grau de usabilidade e excelência na qualidade da interface e dos componentes que a compõe. Hoje há uma enorme diversidade de componentes gráficos já desenvolvidos e que podemos adaptar/incluir numa aplicação, com características diferentes, uns pagos, outros gratuitos, mas o desenvolvimento de software para a web disseminou-se de tal forma que já existem bibliotecas de partilha de componentes para a interface das aplicações, como por exemplo o CodePen (<https://codepen.io/>). Esta evolução com a exposição de todo o seu potencial, aliada ao facto de uma aplicação web ficar disponível na rede, isto é, independentemente do local físico poder aceder à mesma sem ser necessário instalar nada além do browser, fizeram-me tomar a decisão de desenvolver a HMI com tecnologias web, pese embora a interface que está a operar o equipamento deva estar junto do mesmo por questões de melhor controlo e monitorização do processo de fabrico aditivo, há todo um conjunto de possibilidades e potencial por explorar no facto de ser possível obter informação em tempo real do equipamento de forma remota. Face a esta decisão, a arquitetura esquematizada para o sistema e as tecnologias que o compõe podem ser visualizadas no esquema abaixo.

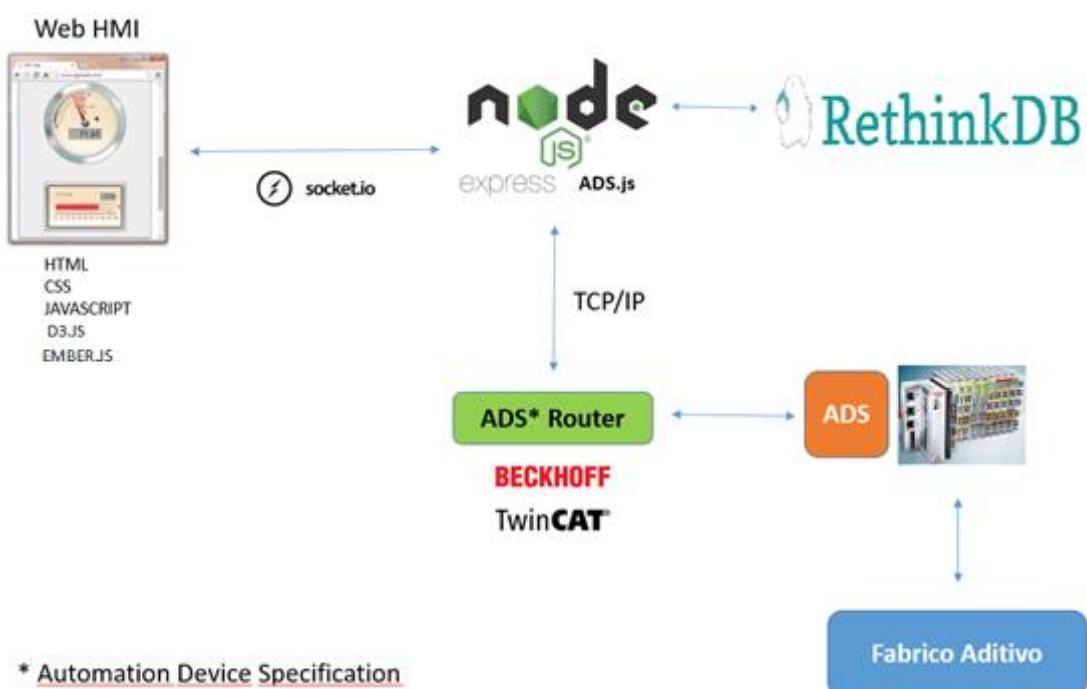


Figura 51 - Arquitetura da Solução Final

Como se pode constatar, o projeto é composto por várias camadas, sendo uma delas a interface para o utilizador composta por HTML, CSS, JAVASCRIPT, D3.JS (biblioteca de gráficos em javascript) e EMBER.JS (*framework* para desenvolvimento de aplicações web) e este corresponde ao lado cliente do sistema.

Outra camada do sistema é o *backend*, para o qual foi tomada a opção de utilizar a tecnologia Node.JS em conjunto com uma base de dados documental (NoSQL), RethinkDB, que permite armazenar e persistir informação relevante. A escolha destas tecnologias para o efeito foi motivada por diversos fatores, sendo que em primeiro lugar para *backend* da aplicação tinha que ser uma tecnologia para a qual o Twincat (tecnologia de automação utilizada) disponibilizasse uma interface, isto é, permitisse facilmente estabelecer comunicação e também seria importante utilizar uma tecnologia que garantisse fiabilidade e eficiência para transmissão da informação em tempo real. Estes pontos em conjunto com um artigo lido (Bermudez-Ortega et al., 2016) e descrito no capítulo 2.6.2 Sistemas Web-Based para Controlo e Automação, que relata a implementação de um sistema baseado em tecnologias web para controlo remoto de PLCs de um laboratório de controlo onde a camada de automação está assente nas mesmas tecnologias que este projeto (Twincat, do fabricante Beckhoff) e a camada de *backend* assenta em NodeJS, foram fundamentais para a tomada de decisão de assumir o *backend* na mesma tecnologia. A juntar a isto, importa também realçar o facto de o NodeJS ser uma tecnologia recente, que tem como principais características o facto de ser orientada a eventos e de ter sido pensada desde o início para programação assíncrona, que em conjunto com a livraria de javascript Socket.IO (<https://socket.io/>) torna o cenário propício para aplicações com transmissão de dados em tempo real.

Em relação à base de dados, a opção tomada foi por uma documental, a RethinkDB (<https://www.rethinkdb.com/>), por ter uma arquitetura robusta e um motor otimizado para aplicações em tempo real, em conjunto com outras características técnicas que tornam o emparelhamento com o NodeJS fácil de configurar. A RethinkDB guarda os dados em documentos JSON e fornece possibilidades de ligação a um vasto leque de tecnologias como Javascript, Ruby, Python, Java, etc.

A camada de automação do projeto é composta por *hardware* e *software* do fabricante Beckhoff (<https://www.beckhoff.com/>), sendo o *software* Twincat 3 (<https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/twincat-3.htm>) o que permite comunicar com o *backend* em NodeJS e simultaneamente enviar/receber comandos através de *inputs/outputs* vindos do *hardware* e do próprio processo de Fabrico Aditivo.

4.3 AVALIAÇÃO DA INTERFACE

Sendo que a interface é a parte visível de todo o sistema e que interage e comunica tanto com o utilizador como com o equipamento de fabrico aditivo, tornou-se fundamental realizar uma avaliação da mesma, assim como da sua usabilidade. Os testes de usabilidade são processos que visam avaliar a usabilidade de um produto (sistema, interface, etc.), preferencialmente com a participação de grupos de potenciais utilizadores, permitindo assim aprimorar e trazer críticas construtivas sobre a usabilidade do mesmo. Num cenário ideal, os participantes dos testes serão utilizadores reais e que executam tarefas reais, criando assim um cenário muito idêntico à realidade a que o produto vai ser sujeito assim que for lançado, e os resultados dos testes serão obtidos a partir da observação e medição da interação entre os participantes e a interface (Afonso, Lima, & Cota, 2013).

Para a realização dos testes de usabilidade foram seguidas duas estratégias de avaliação do sistema, juntamente com um grupo de 4 utilizadores e ainda a maquete funcional executada no ecrã tátil do equipamento. Considerando que a solução a desenvolver seria para um equipamento específico, isto é, orientada ao Fabrico Aditivo, tornou-se mais difícil selecionar utilizadores com conhecimento suficiente para a realização de testes de usabilidade, no entanto, segundo Jakob Nielsen(Nielsen, 2000) um grupo de 5 utilizadores poderá ser suficiente para obter resultados de valor e cobrir aproximadamente 90% dos problemas de usabilidade existentes. Nielsen defende que o número de problemas de usabilidade poderá ser encontrado com a fórmula $N(1-(1-L)^n)$, onde N é o número total de problemas de usabilidade, n é o número de utilizadores e L é a proporção de problemas de usabilidade descobertos com testes de apenas 1 utilizador. O valor médio de L é 31%, calculado com base em vários projetos estudados por Nielsen, e com base neste valor é possível gerar o gráfico da figura abaixo.

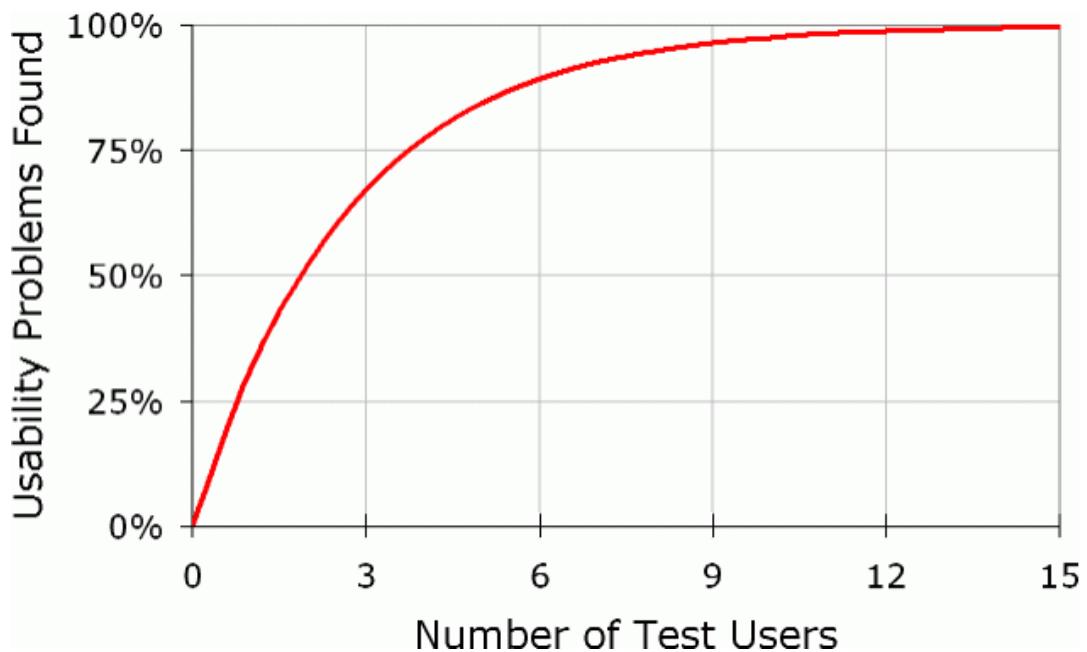


Figura 52 - Problemas de Usabilidade vs Número de Utilizadores.

Fonte: <https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users>

O gráfico gerado considera no eixo do X o número de utilizadores para efetuar testes e no eixo do Y a percentagem de problemas de usabilidade encontrados, e através do mesmo é possível perceber que a grande aquisição de problemas de usabilidade acontece aproximadamente até ao quinto utilizador, onde se atinge os 90% de problemas encontrados. Daí para a frente encontra-se cada vez menos problemas e por isso, Nielsen defende que depois do quinto utilizador os testes tornam-se pouco produtivos visto que os utilizadores começam a repetir problemas encontrados e deixam de adquirir situações novas. No projeto desenvolvido no âmbito desta tese, foi apenas possível envolver um grupo de 4 (quatro) utilizadores para efeitos de teste e avaliação da interface, que utilizando os argumentos de Nielsen numa primeira iteração de testes serviriam para cobrir aproximadamente 80% dos problemas de usabilidade.

A primeira estratégia de avaliação foi baseada no inquérito SUS (System Usability Scale), que permite medir a usabilidade de um sistema através de um conjunto de dez questões, e em que as respostas utilizam a escala Likert e devem variar entre 1 ("Strongly Disagree" ou Discordo fortemente) e 5 ("Strongly Agree" ou Concordo fortemente) (Brooke, 1995). Esta ferramenta permite avaliar um largo conjunto de produtos ou serviços e tem como principais vantagens o facto de conseguir facilmente diferenciar sistemas usáveis de não usáveis, de ser bastante fácil de aplicar, entre outras.

		Utilizador1	Utilizador2	Utilizador3	Utilizador4
Q1	I think that I would like to use this system frequently.	4	4	4	5
Q2	I found the system unnecessarily complex.	1	1	1	1
Q3	I thought the system was easy to use.	5	4	5	4
Q4	I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.	3	2	2	2
Q5	I found the various functions in this system were well integrated.	5	3	4	4
Q6	I thought there was too much inconsistency in this system.	1	1	1	1
Q7	I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.	5	4	5	4
Q8	I found the system very cumbersome to use.	1	2	1	1
Q9	I felt very confident using the system.	5	5	4	5
Q10	I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.	2	1	1	1
SUS Score		90	82.5	90	90

Score Final | 88.125

Tabela 2 - Avaliação com SUS (System Usability Scale)

Na tabela acima são disponibilizados os resultados do SUS, por questão e por utilizador, sendo que para calcular o “SUS Score” por utilizador é usado um método de cálculo específico da ferramenta e para o cálculo do “Score Final” é utilizada a média aritmética de todos os “SUS Score” calculados. O resultado final foi de 88.125 num máximo de 100, que indica um alto grau de satisfação dos utilizadores acerca da usabilidade do sistema.

A segunda estratégia foi baseada num conjunto de questões, fechadas e abertas, consideradas importantes para compreender a visão que os utilizadores teriam acerca das maquetes da interface. Era importante dar alguma liberdade aos potenciais utilizadores do equipamento para que se exprimissem de forma aberta e contribuíssem com sugestões que podiam ser valiosas, umas mais que outras, mas era um *feedback* relevante.

Desta abordagem de avaliação, cujas respostas dos utilizadores estão disponibilizadas na secção de Anexos da Figura A1 até à Figura A4, resultou um conjunto de sugestões de melhorias que foram compiladas num único ficheiro (ver tabela abaixo).

	Sugestão
1	Possibilidade de colocar tabs dos parâmetros (aquecimento, insuflação de ar, outros....) num menu "escondido" visivel apenas através de um botão
2	Armazenar histórico de linhas MDI inseridas, ou pelo menos as últimas X linhas inseridas via MDI
3	Botão de Emergência também na interface
4	No Modo de Operação "Manual" ter uma caixa de texto que permita ao utilizador inserir um valor que será o valor de avanço (para não ficar limitado ás opções atuais de 0,1,1 e 10). O eixo avança/recua enquanto o utilizador pressionar o botão do mesmo
5	Eixo X,Y e Z colocar label "mm", eixo B e C colocar label graus (º)
6	Evitar uso do scroll. Em caso de overload de informação, é possível utilizar scroll (pouco).
7	No Histórico adicionar a coluna "Duração" de cada execução de ficheiro código G
8	Para todas as velocidades colocar botão "100%" que permite voltar á velocidade inicial, após esta já ter sido alterada durante uma execução de programa código G
9	Jogar com cores (verde, vermelho...)nas temperaturas que têm "atual vs desejada"
10	Botão para expandir linhas de código G (para umas 20 ou 25) que estão a ser executadas, por exemplo para confirmar se programa que está a correr é a versão correta.

Tabela 3 - Sugestões de Melhoria dos Utilizadores

As sugestões deixadas pelos utilizadores visavam de uma forma geral a melhoria do controlo e manuseamento do equipamento, assim como a obtenção do máximo de informação útil.

Os pontos 1,2,3,4,6,8,9 e 10 são também sugestões de melhoria numa perspetiva de usabilidade do sistema, sendo que todas implicam o desenvolvimento da funcionalidade em questão. Já os pontos 5 e 7 são melhorias que permitem ao utilizador obter mais informação relevante sobre o sistema e o processo.

Este conjunto de sugestões foi avaliado e priorizado de forma a selecionar aquelas que seriam realmente importantes para o processo e que, por sua vez foram consideradas e implementadas no sistema, sendo elas as sugestões 5, 6, 7, 8 e 9 da tabela anterior.

As restantes sugestões encontram-se compiladas e armazenadas para, possivelmente, implementação futura caso faça sentido.

4.4 SISTEMA DESENVOLVIDO

Todo o caminho percorrido nos capítulos anteriores contribuiu de forma decisiva para o desenvolvimento deste capítulo. Desde as definições e conceitos, ao estado da arte, trabalhos relacionados, protótipo funcional desenvolvido e ainda as maquetes e avaliação da interface. Uns terão influenciado o produto final de forma mais leviana, outros de forma mais explícita, mas todos acabaram por contribuir e por me encaminhar para o que será descrito neste capítulo.

Posto isto, antes de avançar para a descrição da solução final torna-se relevante referenciar uma questão importante referente ao equipamento. A estrutura física do mesmo assenta num esquema de 5 eixos, sendo eles os eixos do X, Y e Z para movimentação da cabeça extrusora e os eixos B e C que estão relacionados com a movimentação do tabuleiro para onde o material é extrudido. O eixo B diz respeito à inclinação do tabuleiro e o eixo C à rotação do tabuleiro sobre si próprio (ver figura seguinte). Um dos principais desafios de implementação de uma interface que controla a movimentação de um conjunto de eixos é precisamente a representação gráfica que cada um deles tem, para que em conjunto com a sua posição permita ao utilizador compreender mais rapidamente o que está a acontecer com os mesmos durante períodos de impressão, dado que nesses momentos os eixos têm variações de posição muito rápidas.

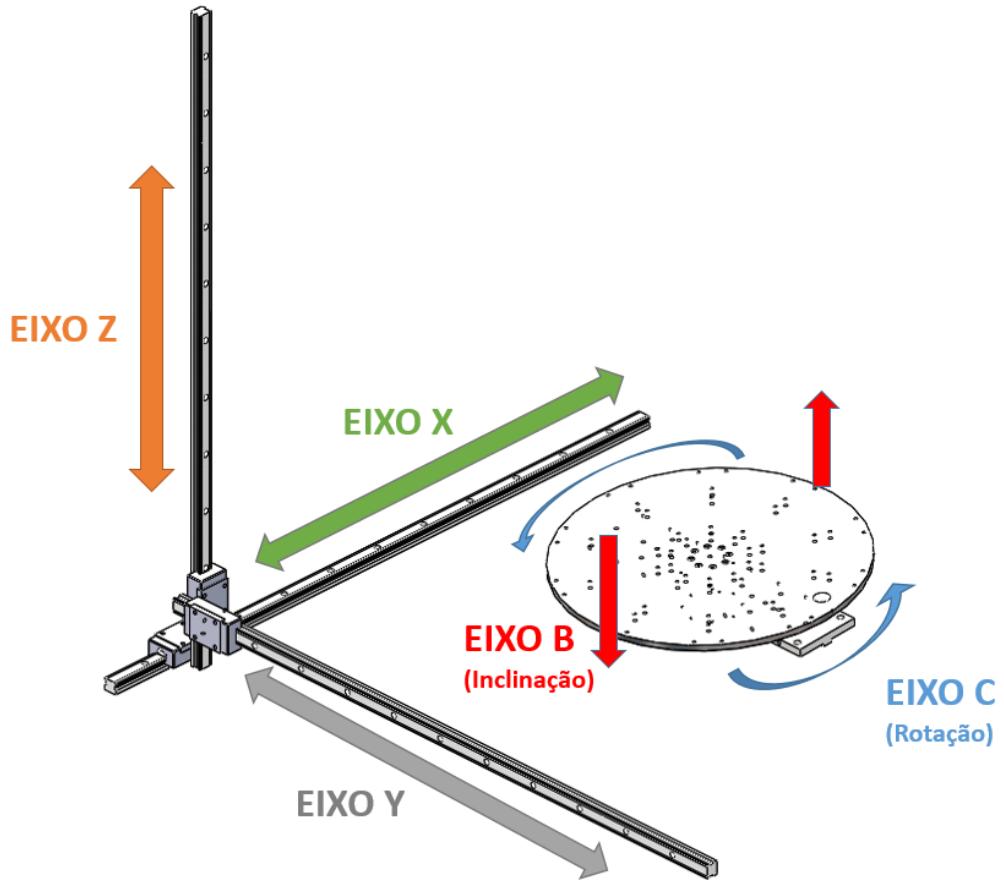


Figura 53 - Esquema de eixos do equipamento

O sistema desenvolvido é disponibilizado ao utilizador através de uma interface web, que é executável através de um *browser*. Além desta camada de interface gráfica, o sistema tem também uma camada de *backend* desenvolvida com recurso à tecnologia NodeJS (ver capítulo 4.2 Arquitetura Final) e a uma base de dados documental, RethinkDB, que por sua vez, estão conectados à solução de automação Twincat.

Assim, o ecrã inicial disponibilizado ao utilizador é o da figura abaixo:



Figura 54 - Ecrã Inicial

Como é possível verificar, a interface pode ser dividida em três grandes grupos de utilização.

O grupo superior contém informação de controlo do processo, isto é, permite que o utilizador monitorize em tempo real a posição dos eixos, as velocidades e as temperaturas. A posição dos eixos é disponibilizada através de um valor em milímetros e acompanhada de um objeto gráfico que representa o eixo. No caso dos eixos X, Y e Z o objeto gráfico é uma barra de progresso para cada um. Já o eixo B, que no equipamento real corresponde à inclinação do tabuleiro onde decorre a impressão, é representado por uma barra fixa horizontal a cinzento e uma barra azul (dinâmica) que demonstra a inclinação da mesa (como se o tabuleiro fosse visto de perfil), correspondente a um determinado ângulo em graus celsius. Por último, o eixo C, que no equipamento real corresponde à rotação do tabuleiro sobre ele próprio, é representado por uma circunferência e um ponto vermelho com uma linha azul (dinâmicos) desde o centro da circunferência para visualização do ângulo de rotação (como se o tabuleiro fosse visto de cima). Nas duas figuras seguintes é possível visualizar com mais detalhe os eixos B e C em posições diferentes, assim como a respetiva representação gráfica.

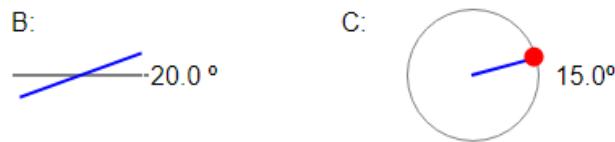


Figura 55 - Eixos B e C

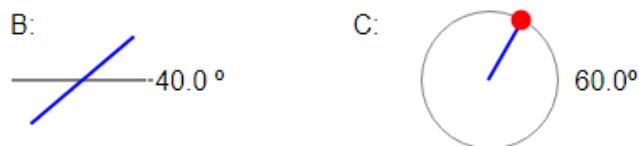


Figura 56 - Eixos B e C

Em relação à disponibilização da informação das velocidades e temperaturas em tempo real, as primeiras são apenas disponibilizadas através de um valor em milímetros por segundo, ao passo que as segundas são estilizadas com cores diferentes consoante o valor (se menor que 31 azul, se está entre 31 e 80 verde, se superior a 80 vermelho) acompanhadas de uma barra vertical com a mesma lógica de cores e que também é dinâmica em altura (ver figura seguinte). Estes intervalos de valores representam os valores ideais para temperaturas de uma forma genérica (pode haver exceções consoante o objeto a imprimir), assim como os máximos e mínimos, e permite ao utilizador mais rapidamente identificar anomalias em relação às temperaturas.



Figura 57 - Visualização das temperaturas na HMI

No grupo intermédio é possível o utilizador recorrer a vários modos de operação (Automático, Manual ou MDI) para manusear o equipamento.

No modo de operação Automático o utilizador poderá escolher um ficheiro de formato “gcode” e executar no equipamento através do botão “Iniciar”. As linhas de código G que estão a ser executadas são disponibilizadas na tabela, e durante a execução do ficheiro o utilizador poderá sempre optar por pausar ou parar. É disponibilizada também uma funcionalidade para visualizar os objetos a imprimir em três dimensões (botão “Ver 3D”), através de uma aplicação desenvolvida em EMBER.JS que interpreta o código G e desenha num objeto *canvas* no *browser* (ver figuras seguintes).

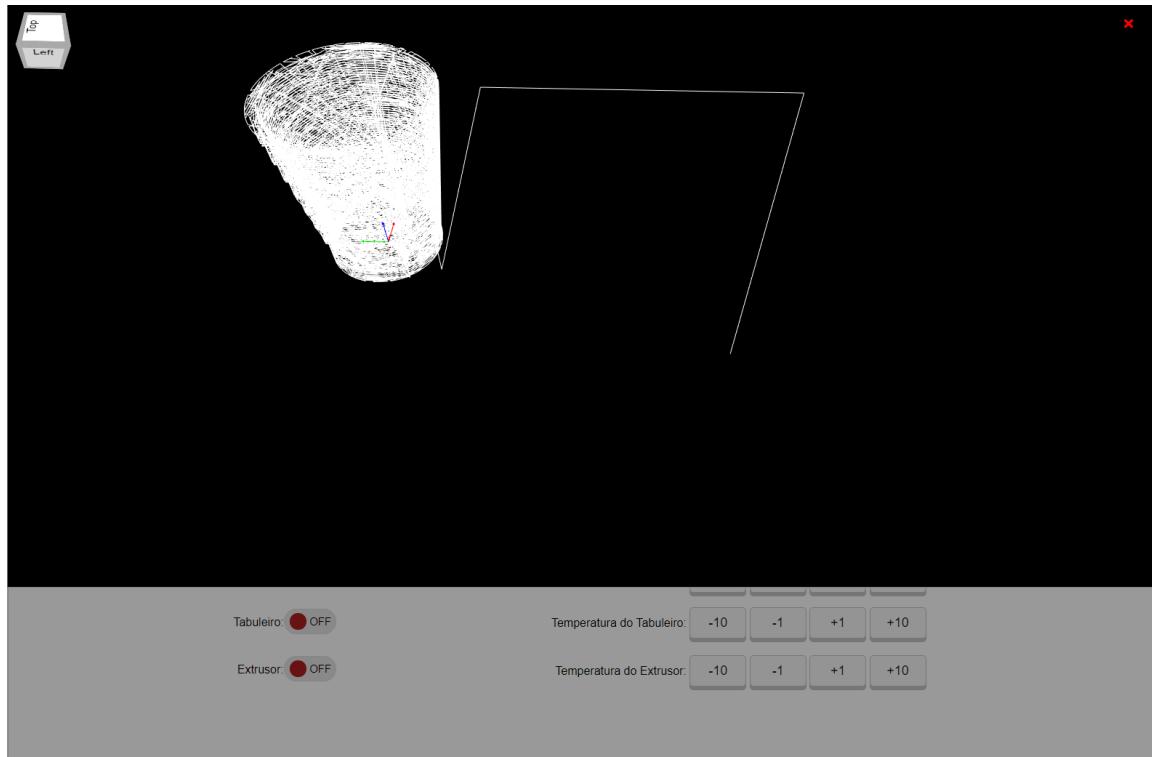


Figura 58 - Visualização do objeto em 3D

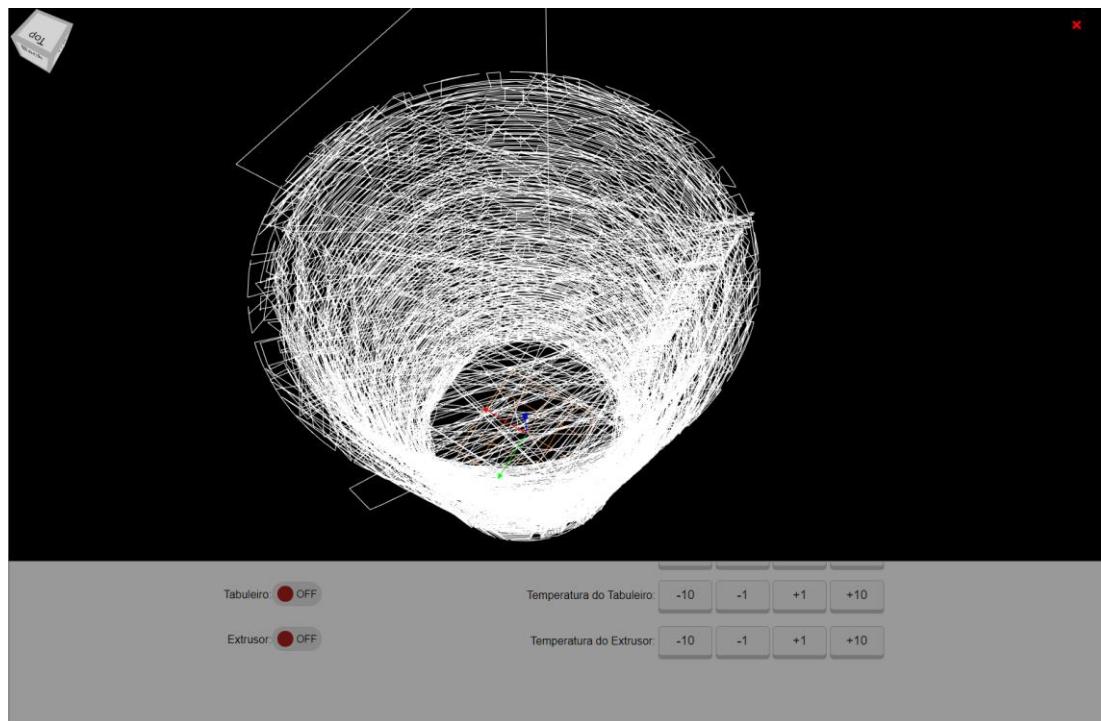


Figura 59 - Visualização do objeto em 3D



Figura 60 - Modo de operação Automático

No modo de operação Manual é possível o utilizador efetuar movimentos curtos (entre 0.1 e 10) e singulares nos eixos, e fazer *Homing* aos mesmos (enviá-los para uma posição de segurança).

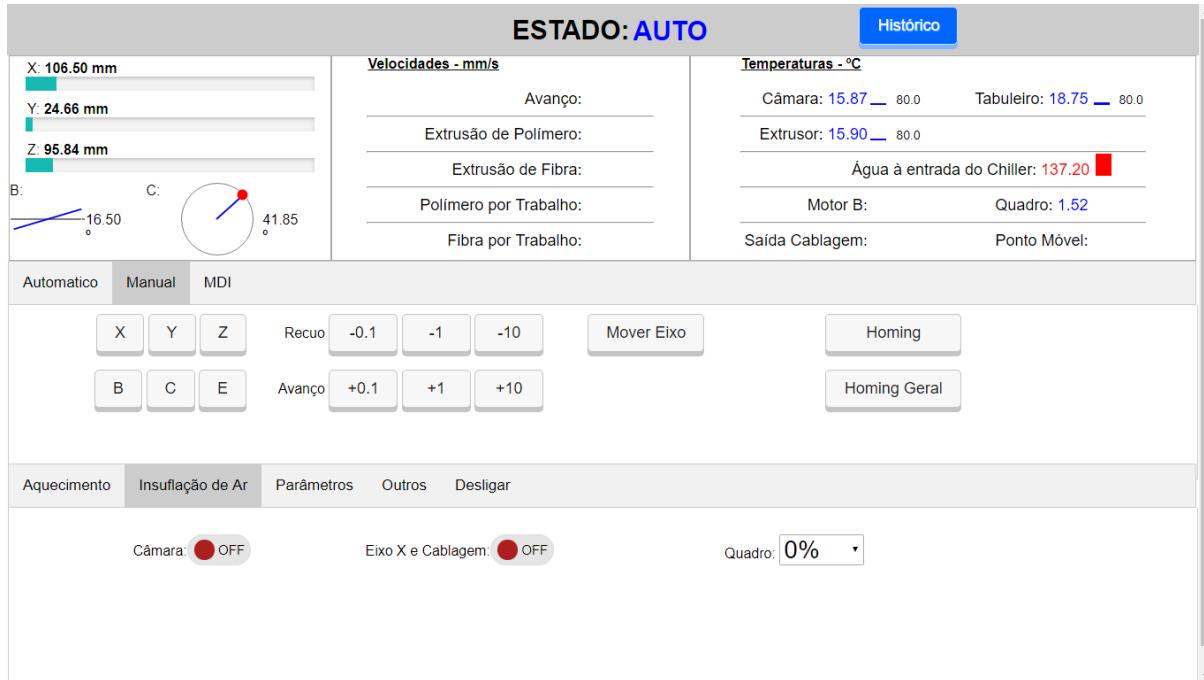


Figura 61 - Modo de Operação Manual

No modo de operação MDI o utilizador pode inserir um comando em código G através de um teclado virtual e executar no equipamento. O teclado virtual disponibiliza apenas um conjunto de teclas fixas com as quais se pode construir comandos em código G para o equipamento interpretar.



Figura 62 - Modo de Operação MDI



Figura 63 - Teclado virtual para inserção de linha no modo MDI

No grupo inferior, o utilizador pode efetuar alterações de parâmetros em tempo real durante a execução do processo de impressão. Estes parâmetros incluem temperaturas da

câmara, do tabuleiro, do extrusor, ligar sistemas de aquecimento da câmara, do tabuleiro, do extrusor, ligar insuflação de ar da câmara, alterar velocidades de extrusão do polímero, da fibra, entre outros. Ver figuras anteriores para visualizar parâmetros respectivos ao sistema de aquecimento, à insuflação de ar e às velocidades, e ver figuras seguintes para outros parâmetros e para desligar partes do equipamento.



Figura 64 - Ajuste de Mesa e Iluminação da Câmara



Figura 65 - Desligar partes do equipamento

Além das funcionalidades anteriormente descritas, o utilizador possui ainda um botão de “Histórico” que permite visualizar o histórico de execuções de ficheiros de código G, assim como alguma informação acerca das mesmas (temperaturas médias, máximas, etc.).

Ao clicar no botão “Histórico”, o utilizador irá ver disponibilizada a tabela da figura seguinte.

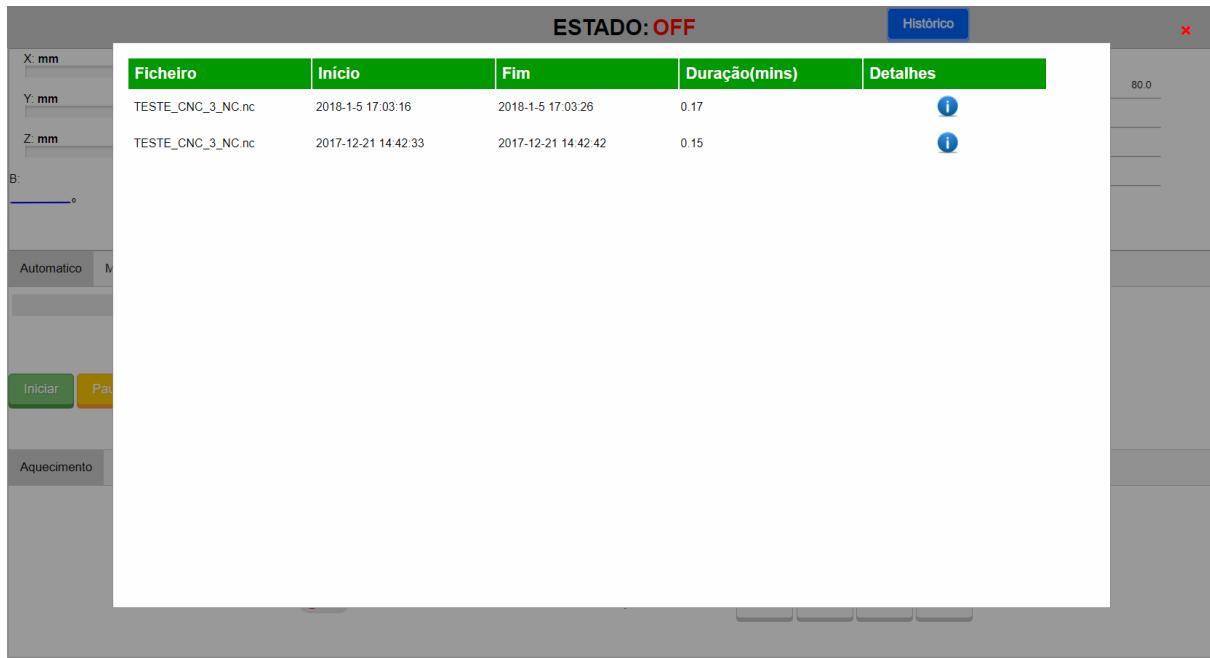


Figura 66 - HMI: tabela de execuções

Nesta tabela constam as execuções de ficheiros de código G, com o nome do ficheiro, o início, fim, duração e ainda os detalhes. Se o utilizador clicar nos detalhes de uma execução, é disponibilizado um conjunto de informação, como as temperaturas mínimas, médias e máximas, assim como um gráfico de linhas com todas as temperaturas registadas durante o processo de execução do ficheiro (ver figura abaixo). Esta informação pode-se revelar particularmente importante visto ser possível visualizar várias temperaturas ao mesmo tempo permitindo assim encontrar padrões na variação das mesmas.

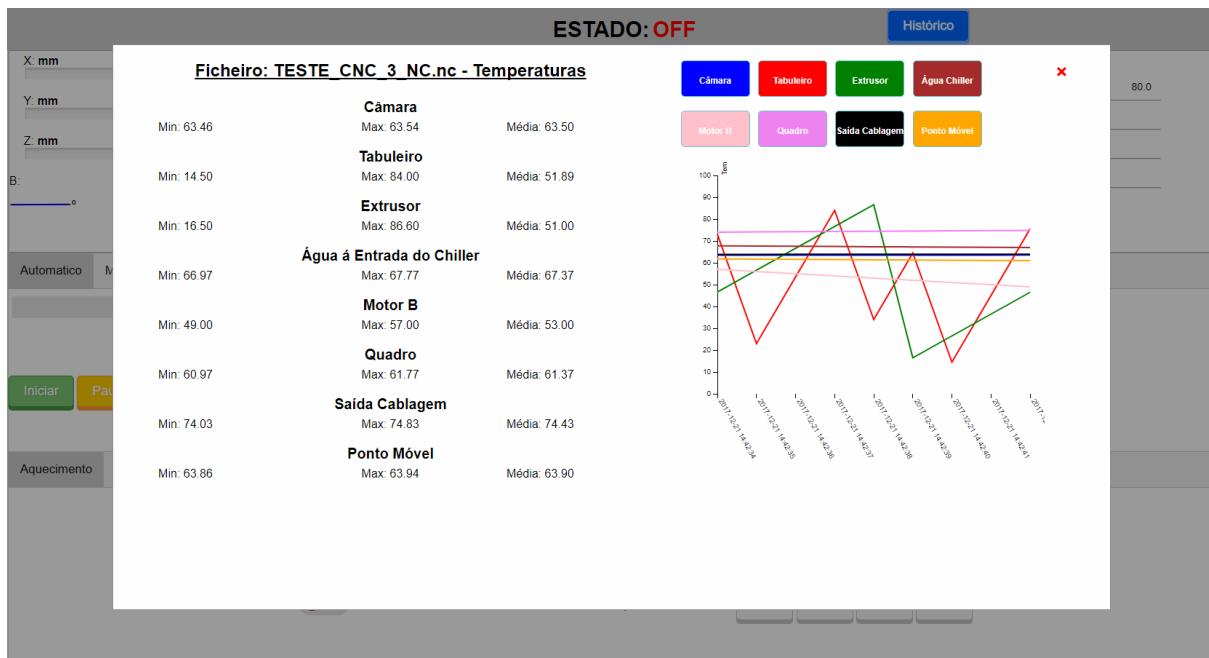


Figura 67 - HMI: temperaturas de uma execução

4.5 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo tem como objetivo demonstrar e dissertar sobre os resultados que foram obtidos com o projeto e ainda estabelecer termos de comparação com objetivos definidos, assim como com requisitos levantados em cooperação com os potenciais utilizadores.

O sistema desenvolvido consiste fundamentalmente numa interface web suportada por uma camada de *backend* que por sua vez estabelece e gere a comunicação com a camada de automação, e como tal, tornou-se essencial para fechar o ciclo deste projeto realizar testes à HMI desenvolvida estando esta conectada ao equipamento de fabrico aditivo final. Estes testes foram possíveis de executar com o grupo de quatro utilizadores que participaram nos inquéritos de validação da interface, descritos no capítulo 4.2, no entanto dado que a impressão de peças tem um custo adjacente ao material que é utilizado, apenas foi possível concretizar a impressão de uma peça, no teste realizado com o utilizador 2. Nos restantes testes o mesmo procedimento foi realizado com a única diferença de que apesar dos eixos do equipamento fazerem os mesmos movimentos, as peças não eram impressas. Essa diferença era explícita através de um atributo no conteúdo do código G e, portanto, na perspetiva da HMI a funcionalidade seria exatamente a mesma porque apenas garantia o upload do ficheiro selecionado pelo utilizador e dava a ordem ao controlador para iniciar a sua execução.

Dado que o equipamento ainda não se encontra finalizado do ponto de vista de automação, isto é, algumas das suas funcionalidades ainda não se encontram implementadas e em alguns casos há mesmo falta de instrumentos, tornou impossível o desenvolvimento das mesmas na HMI (apesar de estar previsto vir a acontecer brevemente), no entanto o equipamento já permite executar algumas das tarefas mais importantes, sendo que uma delas é, claramente, a execução de um ficheiro de código G e respetiva monitorização em tempo real.

Em relação aos sub-objetivos traçados para o projeto, aqueles que já se encontram implementados e em funcionamento são:

- Módulo de controlo básico do equipamento: ligar, desligar, pausar equipamento, parar equipamento, monitorizar posição dos eixos e estado geral do equipamento
- Modos de Operação: Manual e Automático
- Monitorização de parâmetros em tempo real: posições dos eixos X,Y,Z,B e C e temperaturas da câmara, do tabuleiro, do extrusor, do quadro, da cablagem, do ponto móvel e da água à entrada do chiller

- Importar remotamente e executar ficheiros de código G
- Visualizar o código G a ser executado em tempo real
- Recolha e armazenamento de dados das impressões
- Visualização de histórico de impressões
- Visualização da peça em 3D através do código G (apenas possível em ficheiros que contêm 3 eixos)

Já quanto ao levantamento de requisitos efetuado em conjunto com um grupo de potenciais utilizadores, o ponto de situação da HMI é o das duas figuras abaixo.

Funcionalidade	Detalhes	Implementado?	Tipo
Ver Posições dos Eixos	Posição Eixo X	✓	Informativo
	Posição Eixo Y	✓	
	Posição Eixo Z	✓	
	Posição Eixo B	✓	
	Posição Eixo C	✓	
Ver velocidades de trabalho	Avanço	✓	Informativo
	Velocidade de Extrusão de Polímero	✗	
	Velocidade de Extrusão de Fibra	✗	
	Polímero extrudido por trabalho	✗	
	Fibra extrudida por trabalho	✗	
Visualizar Dados de Temperatura	Temperatura da Câmara* (atual/desejada)	✓	Informativo
	Temperatura do Tabuleiro (atual/desejada)	✓	
	Temperatura do Extrusor (atual/desejada)	✓	
	Temperatura da água à entrada do Chiller	✓	
	Temperatura do motor B	✗	
	Temperatura do Quadro	✓	
	Temperatura da saída de Cablagem	✓	
Controlo do sistema de aquecimento	Temperatura "ponto móvel"	✓	Funcional
	Aquecimento da Câmara (On/Off)	✓	
	Aquecimento do Tabuleiro (On/Off)	✓	
	Aquecimento do Extrusor (On/Off)	✓	
	Definir Temperatura da Câmara	✗	
	Definir Temperatura do Tabuleiro	✗	
Controlo do sistema de insuflação de ar	Definir Temperatura do Extrusor	✗	Funcional
	Ventilação da câmara (On/Off)	✓	
	Ventilação do eixo x e Cablagem (On/Off)	✗	
	Ventilação do Quadro (0/50%/100%)	✗	
Modo de Operação (Alterável)	Automático	✓	Funcional
	Manual	✓	
	MDI	✗	
Comandos de Execução Automática	Importar ficheiro de código	✓	Funcional
	Iniciar	✓	
	Pausa	✓	
	Parar	✓	
	Homing Geral	✗	
	Homing de um eixo selecionado	✗	

Figura 68 - Requisitos implementados na HMI

Funcionalidade	Detalhes	Implementado?	Tipo
Comandos de Execução MDI	Executar comando	✗	Funcional
	Pausa	✗	
	Parar	✗	
Comandos de Execução Manual	Escolher Eixo	✓	Funcional
	Definir Quantidade de Avanço/Recuo**	✓	
	Avançar +	✓	
	Avançar -	✓	
	Avançar Extrusor	✗	
	Recuar Extrusor	✗	
Controlo de parâmetros do equipamento	Velocidade de Avanço***	✗	Funcional
	Velocidade de Extrusão de Polímero	✗	
	Velocidade de Extrusão de Fibra	✗	
Ajuste da Mesa de Impressão	Procedimento de Ajuste da Mesa	✗	Funcional
Visualizar Histórico de Execuções	Log de Parâmetros Supracitados	✓	Informativo
Comandos de Execução Manual	Desligar Tudo	✗	Funcional
	Desligar todo o Sistema de Aquecimento	✗	
	Desligar Câmara (Aquecimento + Ventilação)	✗	
	Desligar Motores	✗	
Opções Secundárias	Illuminação da Câmara (On/Off)	✗	Complementar

Figura 69 - Requisitos implementados na HMI

Considerando que os testes efetuados foram idênticos em termos de funcionalidades exploradas na HMI, apenas será descrito ao longo das páginas seguintes o teste realizado com o utilizador 2, que resultou na impressão de uma peça. Em relação a este, a peça a ser impressa correspondia a uma caixa aberta de um dos lados (ver imagem seguinte) e o respetivo código G foi gerado pelo utilizador num software próprio para a geração de código G a partir de imagens 3D (<http://slic3r.org/>).

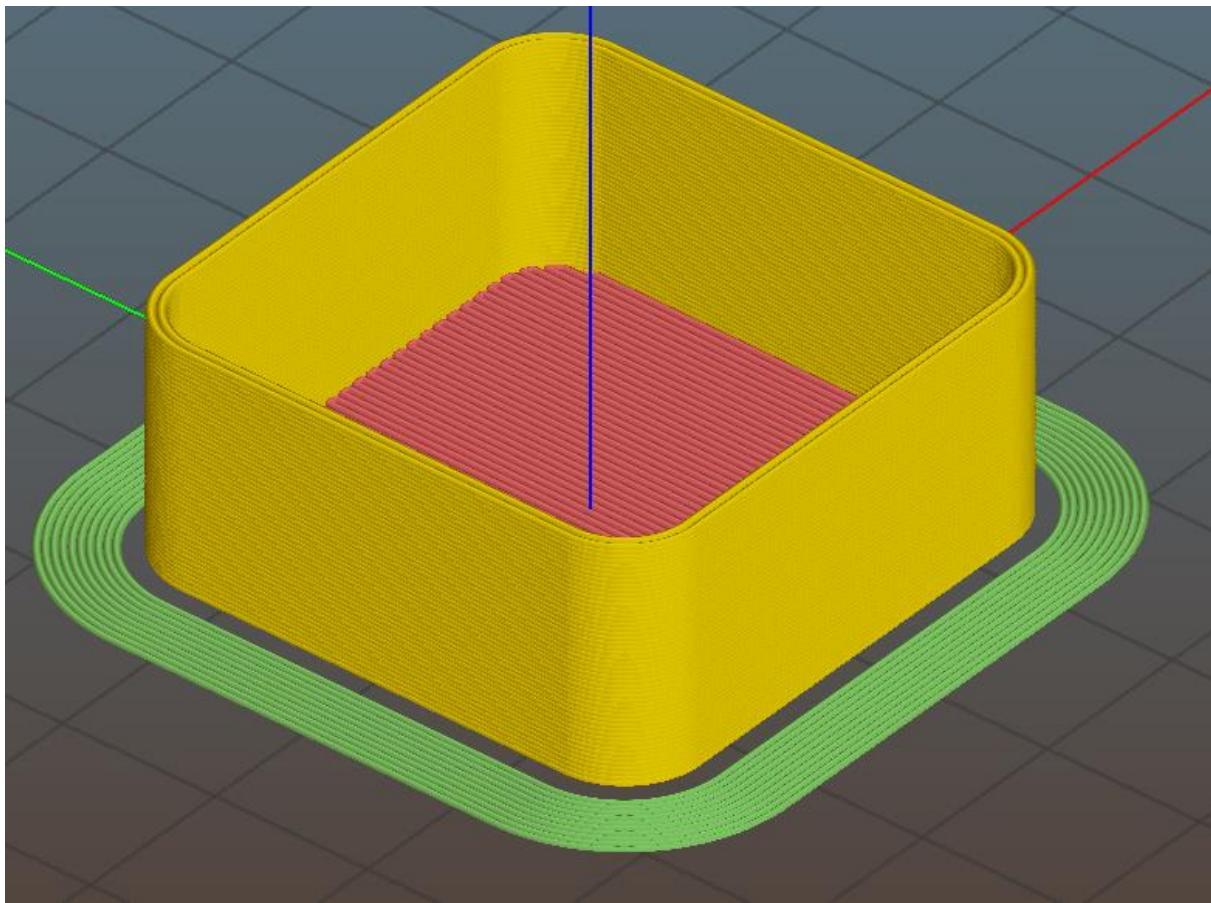


Figura 70 - Imagem 3D da peça gerada no software gerador de código G (<http://slic3r.org>)

Os passos necessários para a impressão da peça através da HMI eram simples, sendo que a partir do momento em que a HMI disponibiliza o estado do equipamento como “ON” é sinal que tem a ligação com a solução de automação corretamente estabelecida, e a partir desse momento bastou ao utilizador selecionar a tab “Automático”, seguido de “Escolher Ficheiro” que abriu uma janela com o explorador do Windows, permitindo ao utilizador selecionar o ficheiro “box.nc” e clicar no botão verde “Iniciar”. A partir desse momento foi dada a ordem de impressão ao Twincat juntamente com o ficheiro respetivo.

Assim que a impressão da peça foi iniciada foi também disponibilizada ao utilizador informação relevante como a posição dos eixos, as temperaturas e as linhas de código G que estavam a ser executadas, de uma forma amigável e intuitiva como é possível verificar na figura abaixo.

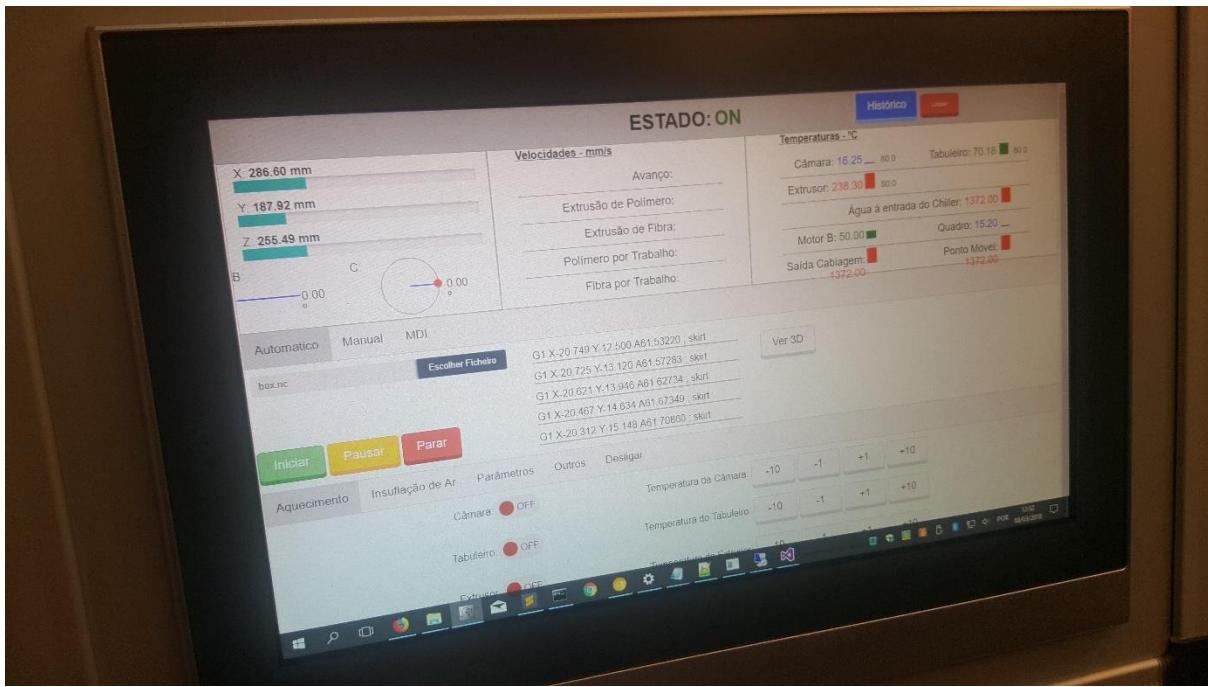


Figura 71 - HMI a monitorizar impressão da peça

Na figura abaixo é possível verificar o processo de impressão numa fase ainda inicial, permitindo identificar as primeiras camadas da peça.

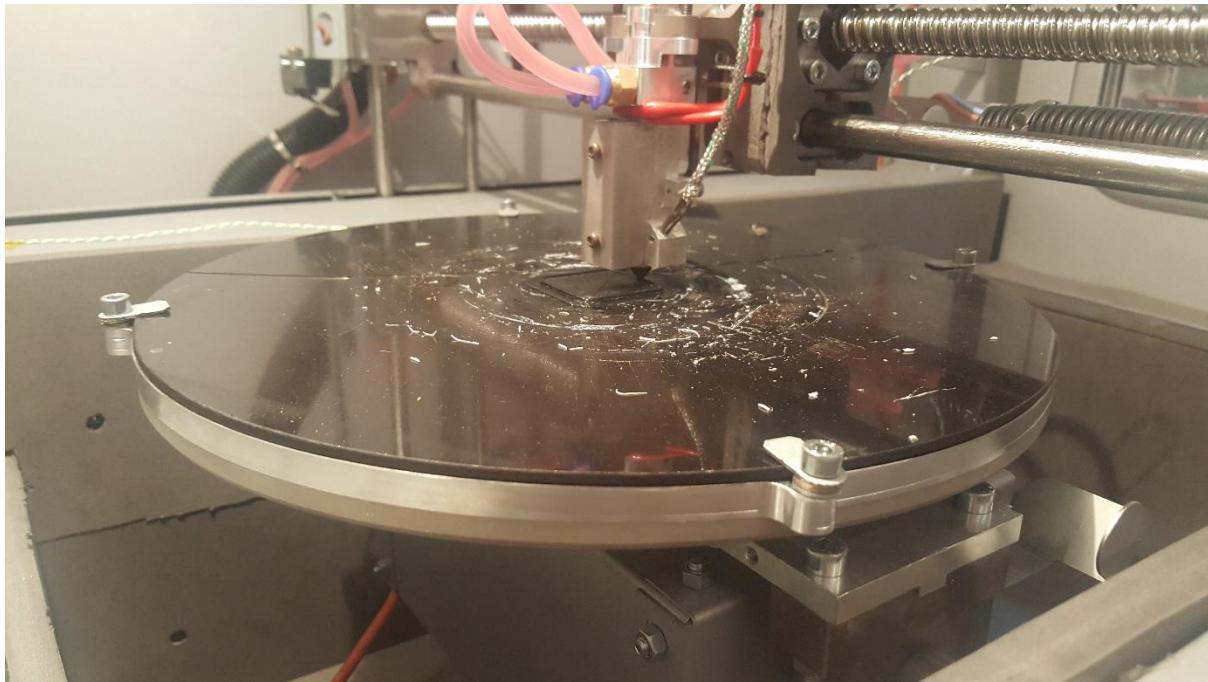


Figura 72 - Primeiras camadas da peça

O tempo necessário para a execução do processo de impressão de uma peça varia consoante a dimensão e número de camadas necessárias para a mesma. Sempre que a impressão termina, os eixos do equipamento recolhem para uma posição de segurança deixando a peça impressa no tabuleiro, tal como é possível ver na figura abaixo.

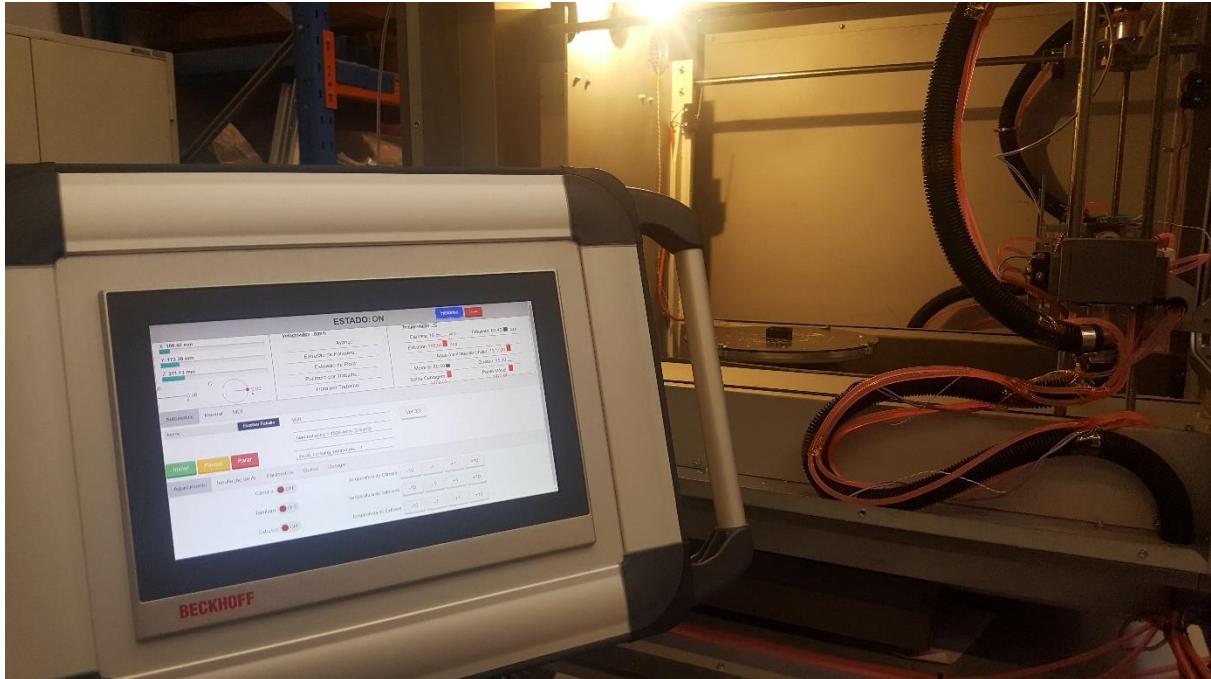


Figura 73 - Peça finalizada

A execução do ficheiro “box.nc” que continha o código G da peça e respetiva impressão da mesma demorou 49 minutos e 44 segundos, decorreu dentro do expectável e o resultado final pode ser visualizado nas figuras abaixo.

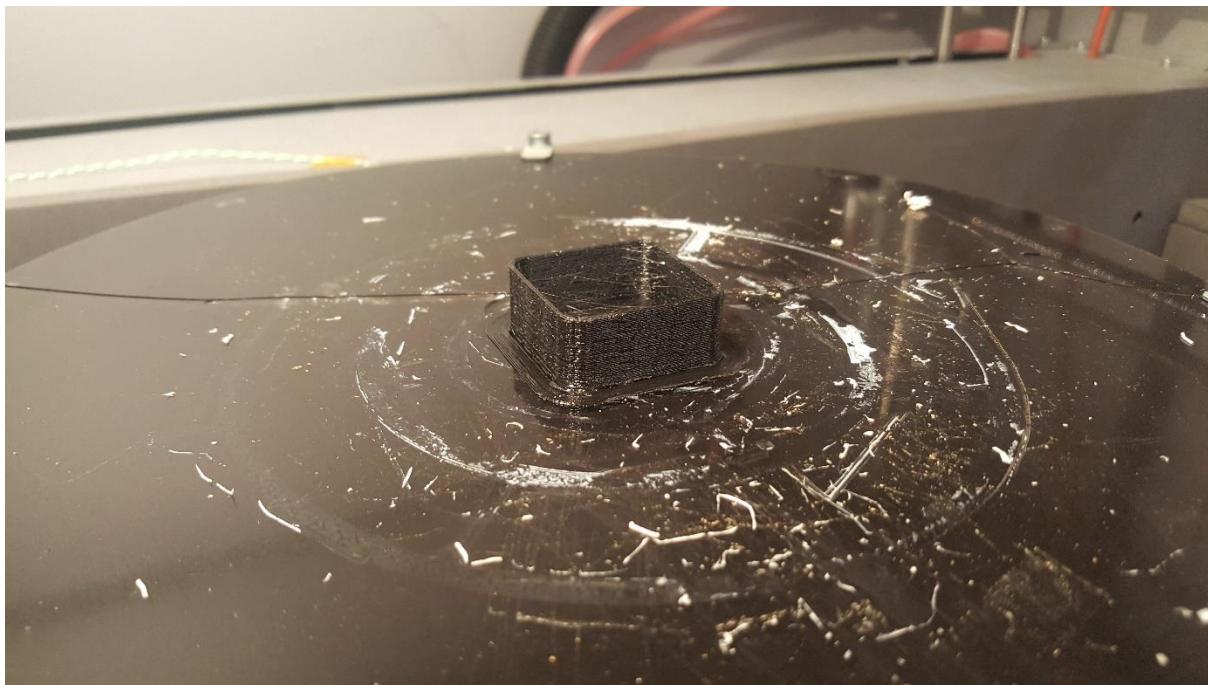


Figura 74 - Peça finalizada e ainda no tabuleiro de impressão

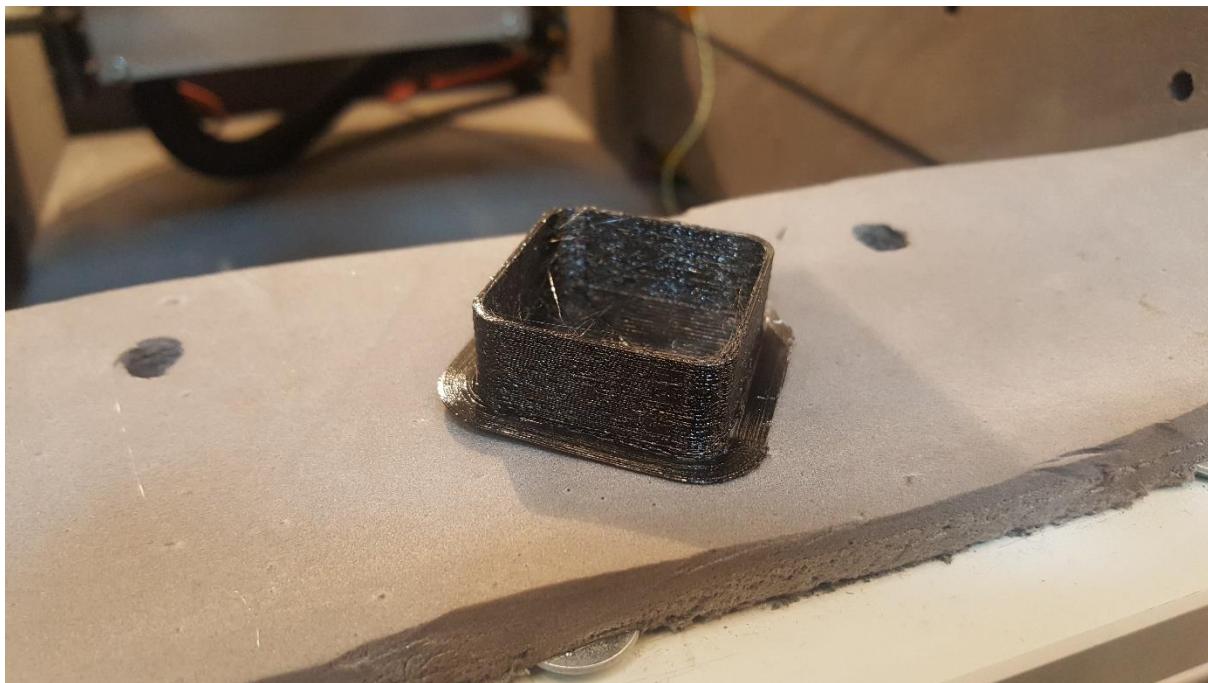


Figura 75 - Peça finalizada e impressa através da HMI

Após realizado o trabalho de impressão da peça é possível fazer análises aos dados registados durante o mesmo em relação às temperaturas sendo disponibilizados os valores mínimos, máximos, médias e ainda um gráfico com uma linha para cada temperatura (ver figuras abaixo).

Ficheiro	Inicio	Fim	Duração(mins)	Detalhes
box.nc	2018-3-8 12:20:32	2018-3-8 13:09:59	49.44	
box_poucas_linhas.nc	2018-3-8 12:09:31	2018-3-8 12:11:54	2.38	
box_poucas_linhas2.nc	2018-3-8 12:06:31	2018-3-8 12:08:43	2.19	
box_poucas_linhas.nc	2018-3-8 12:03:28	2018-3-8 12:05:51	2.38	
box_poucas_linhas.nc	2018-3-8 12:00:16	2018-3-8 12:02:39	2.38	

Figura 76 - Execução do ficheiro "box.nc" registada na base de dados

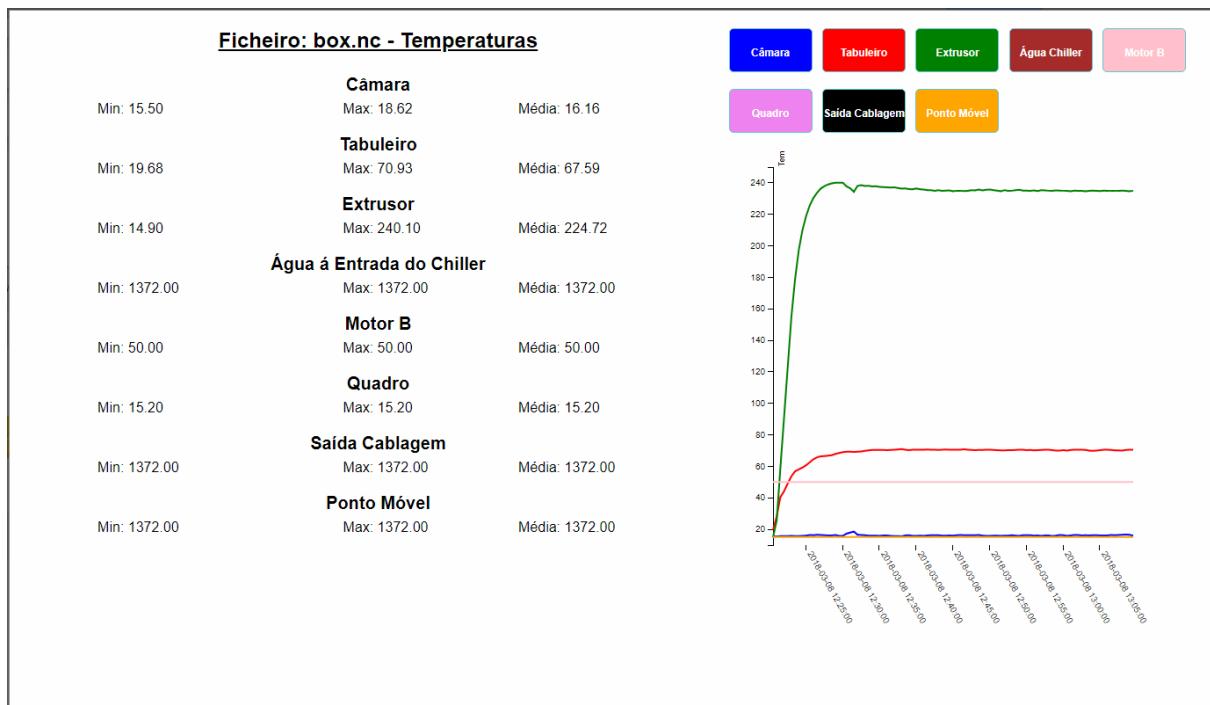


Figura 77 - Temperaturas registadas e gráfico produzido com as mesmas

Após a realização dos testes foi feito novo inquérito SUS aos utilizadores, de forma a obter novo *feedback* acerca das primeiras interações com a HMI.

Na tabela abaixo estão disponibilizados os resultados do inquérito SUS com a avaliação dada por utilizador a cada questão. O resultado final foi de 89.375 num máximo de 100, que indica um alto grau de satisfação na usabilidade do sistema. Este valor comparativamente ao valor das avaliações feitas às maquetes sofreu uma subida, visto que o resultado havia sido 88.125. Analisando os resultados obtidos por utilizador, podemos verificar que o utilizador 3 manteve a avaliação de 90, enquanto que o utilizador 4 foi o único cuja avaliação sofreu uma descida, de 90 para 87.5, e os utilizadores 1 e 2 deram uma avaliação superior à das maquetes, de 90 para 92.5 e de 82.5 para 87.5 respetivamente. Estes resultados indicam que, de uma forma geral, os utilizadores encontram-se satisfeitos com a HMI desenvolvida e que esta correspondeu às suas expectativas.

		Utilizador1	Utilizador2	Utilizador3	Utilizador4
Q1	I think that I would like to use this system frequently.	4	4	4	4
Q2	I found the system unnecessarily complex.	1	1	1	2
Q3	I thought the system was easy to use.	5	5	5	4
Q4	I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.	2	1	2	1
Q5	I found the various functions in this system were well integrated.	5	4	4	4
Q6	I thought there was too much inconsistency in this system.	1	1	2	1
Q7	I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.	5	4	5	4
Q8	I found the system very cumbersome to use.	1	2	1	1
Q9	I felt very confident using the system.	5	4	5	5
Q10	I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.	2	1	1	1
SUS Score		92,5	87,5	90	87,5

Score Final	89,375
--------------------	---------------

Tabela 4 - Avaliação SUS após teste

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

No âmbito desta dissertação propus-me desenvolver uma HMI customizada ao processo de Fabrico Aditivo, assim como estudar conceitos e analisar abordagens já existentes.

Numa primeira fase do projeto foi feita uma contextualização do mesmo, introdução de vários temas relacionados, análise do estado da arte e o desenvolvimento de um protótipo funcional que permitisse validar arquitetura e tecnologias utilizadas. Os primeiros passos do projeto, sobretudo aqueles relativos a investigação e pesquisa de outras abordagens revelaram-se fundamentais para alavancar o mesmo e ajudar na tomada de decisões sobre tecnologias a utilizar e como o fazer. Aqui foi possível verificar que, apesar de já existirem algumas abordagens com semelhanças em relação à minha proposta de solução, existe muito pouca evolução no sentido de aproveitar todo o potencial existente nas áreas tecnológicas e direcioná-lo para áreas de aplicabilidade na indústria, sobretudo se considerarmos a área do Fabrico Aditivo.

Na segunda fase do projeto foi desenvolvida uma solução de raiz, partindo de uma base composta por necessidades que foram documentadas através de um processo de levantamento de requisitos. Estes permitiram depois criar maquetes visuais e obter um primeiro *feedback* dos utilizadores através do preenchimento de inquéritos que, por sua vez, validaram a solução proposta e garantiram previamente o registo dos ajustes necessários. Por último, foi desenvolvida a solução final e foram efetuados testes com a mesma no equipamento real que resultaram na impressão de uma peça utilizando como processo de fabrico o Fabrico Aditivo. Estes testes, que foram realizados com a colaboração dos utilizadores, permitiram fechar um ciclo e confirmar na prática o propósito da criação deste projeto.

Este projeto foi desenvolvido sob uma estratégia que permitiu uma criação única e customizada ao processo para o qual é destinado, o Fabrico Aditivo, e nessa perspetiva em particular é minha convicção de que é um trabalho disruptivo que apresenta e explora abordagens inovadoras através da convergência de áreas científicas diferentes, e por isso mesmo poderá servir de influência e inspiração para outros trabalhos em áreas de aplicabilidade semelhantes, ou mesmo distintas, no futuro.

Durante o desenvolvimento do projeto foi necessário ultrapassar diversos obstáculos que acabaram por servir de aprendizagem para o futuro. Uma das principais dificuldades foi relativamente à pesquisa e investigação de abordagens já existentes considerando as restrições de hardware e software de automação, isto é, era mandatório que a camada de

software desenvolvido para a solução final tivesse a capacidade de comunicar em tempo real com o software Twincat do fabricante Beckhoff, tarefa que não se revelou fácil mas que foi ultrapassada com intensa pesquisa até encontrar um artigo que descreve um sistema com todos os condimentos procurados (Bermudez-Ortega et al., 2016), e também considerando que havia já uma preferência por tecnologias orientadas para a web de forma que fosse possível explorar todo o seu potencial e que não ficasse restringido a especificidades técnicas de um ambiente mais fechado, como por exemplo um sistema operativo. Outra dificuldade que apareceu foi relativa à forma como era disponibilizada a informação relativa à posição corrente dos eixos B (inclinação do tabuleiro) e C (rotação do tabuleiro). Apesar das pesquisas efetuadas, não foi encontrado nenhum componente que representasse graficamente os eixos mencionados e que fosse de aplicação direta na interface, pois esta é uma situação específica deste projeto e que, por isso, contém características únicas. Assim, a opção tomada foi de construir de raíz ambos os componentes tendo como influência várias soluções gráficas já existentes que continham detalhes técnicos que interessavam. Por último é necessário ainda mencionar mais algumas dificuldades como o facto de a solução de automação ainda não estar finalizada, quer por falta de instrumentação (por exemplo falta de sensores para recolha de alguns dados), quer por falta de desenvolvimento na solução de automação Twincat, e ainda o facto de a HMI ser dedicada a um ecrã tátil de 11.6 polegadas, que limita área da janela de exibição e que obriga a que toda a informação e funcionalidades estejam condensadas naquele espaço. Todas as dificuldades foram ultrapassáveis e não foram impeditivas para a finalização do projeto e para a execução de um teste de impressão de uma peça no equipamento real.

Por fim, é importante realçar que a concretização deste projeto permite abrir caminho à exploração de inúmeras possibilidades numa perspetiva de evolução da ferramenta. Tecnologias emergentes são bastantes, que podem trazer claras mais valias e elevar o patamar da mesma e, quem sabe, mudar o paradigma e a forma como, de uma forma geral, são olhadas as interfaces dedicadas aos equipamentos industriais e, em particular, aquelas que apoiam processos de Fábrica Aditivo. Numa perspetiva de trabalho futuro, além da implementação das funcionalidades que estão listadas como requisitos mas que ainda não foram desenvolvidas devido a falta de instrumentação ou de desenvolvimento na camada de automação do projeto, está em perspetiva a integração de um módulo de Realidade Aumentada, possivelmente com o intuito de visualizar em três dimensões a peça a ser impressa e também de obter informação do processo de impressão da mesma em tempo real, de forma a comprovar a viabilidade e sobretudo o enorme valor com que essa tecnologia poderá ser capaz de contribuir na indústria.

REFERÊNCIAS

- 3D printing -- Additive manufacturing: An introduction. (2014). Retrieved from
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=bth&AN=97629391>
- Afonso, A. P., Lima, J. R., & Cota, M. P. (2013). Usability assessment of web interfaces: User Testing. In *2013 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)* (pp. 1–7).
- Alphonsus, E. R., & Abdullah, M. O. (2016). A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs), 60 OP-I, 1185. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>
- Aoki, H., Mitani, J., Kanamori, Y., & Fukui, Y. (2015). AR based ornament design system for 3D printing, 2(1 OP-Journal of Computational Design and Engineering, Vol 2, Iss 1, Pp 47-54 (2015)), 47. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.11.005>
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003](https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003)
- Bermudez-Ortega, J., Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., Chacon, J., & de la Cruz, J. M. (2016). 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Control Applications (CCA), 2016 IEEE Conference on (p. 810). <https://doi.org/10.1109/CCA.2016.7587918>
- Berners-Lee, T. (1991). The Original HTTP as defined in 1991. *World Wide Web Consortium (W3C)*.
- Boone, L. (2017). Industry 4.0 (Fourth industrial revolution). Retrieved from
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=ers&AN=119214086> OP - Salem Press Encyclopedia, January, 2017. 2p.
- Brooke, J. (1995). SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189.
- Canas, R. M. da S., & Pires, J. S. (2014). Simoldes : the impact of additive manufacturing : 3D Printing Technology. Retrieved from
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsrca&AN=rcaap.openAccess.10400.14.16813>
- Capo, A.J., Carreras, J., Dias, J.M., Galli, R., & Gamito, M. (2003). A4D: Augmented Reality 4D System for Architecture and Building Construction.
- Carvalho, A. I. R. de, & Ferrolho, A. M. P. (2016). *Desenvolvimento e melhoramento da Célula Flexível de Fábrica da ESTGV*. Retrieved from

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsrca&AN=rcaap.openAccess.10400.19.3090>

Cavallaro, R. (1997). The FoxTrax hockey puck tracking system. *IEEE Computer Graphics and Applications*. <https://doi.org/10.1109/38.574652>

Cloud Computing: An Overview. (2009). *Queue*, 7(5), 2:3--2:4.
<https://doi.org/10.1145/1551644.1554608>

Constatin, N. B. P., Queiroz, M. H. de, & Catarina, U. F. de S. (2011). Integração de sistemas SCADA com a implementação de controle supervisório em CLP para sistemas de manufatura. Retrieved from
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsrca&AN=rcaap.brazil.123456789.95357>

Daneels, A., & Salter, W. (1999). What is SCADA?

Dias, F. A. N. B., & Fonseca, I. S. A. da. (2015). Desenvolvimento de ferramenta para interligação de dispositivos utilizando protocolos industriais. Retrieved from
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsrca&AN=rcaap.openAccess.10400.26.16571>

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2010). *Modern Control Systems*.

Edwards, P. N. (1996). *The Closed World*.

Ferreira, R. S. (2010). *Desenvolvimento, testes e qualidade de software*.

Gill, S. (2017). Easier automation for food production: what will future food manufacturing look like? Control Engineering Europe spoke to some key industry vendors about the future of food production. As the need for skilled labor increases, and regulations require track, 64(4 OP-Control Engineering. April 2017, Vol. 64 Issue 4, p17, 3 p.), 17.

Guerra, L., Sousa, S. D., & Nunes, E. P. (2016). 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2016 IEEE International Conference on.
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2016.7798002>

How to best design an HMI system: a proper interface between a machine and its human operator greatly impacts efficiency and ease of use and should promote a harmonized connection between the two. Learn how to best build that connection though a human mac. (2015), 62(6 OP-Control Engineering. June 2015, Vol. 62 Issue 6, M10, 3 p.), 10. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsgao&AN=edsgcl.422706900>

HTML 5.2 W3C Recommendation. (2017). Retrieved from
<https://www.w3.org/TR/2017/REC-html52-20171214/>

- HTTP/2 Usage. (2017). Retrieved from <https://w3techs.com/technologies/details/ce-http2/all/all>
- Kacur, J., Durdan, M., & Laciak, M. (2013). Proceedings of the 14th International Carpathian Control Conference (ICCC), Carpathian Control Conference (ICCC), 2013 14th International. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2013.6560527>
- Kerezovic, T., & Sziebig, G. (2016). 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), System Integration (SII), 2016 IEEE/SICE International Symposium on. <https://doi.org/10.1109/SII.2016.7844080>
- Li, H., & Zhang, J. (2011). 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on. <https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987279>
- Mehdi Mekni, A. L. (2014). Augmented Reality: Applications, Challenges and Future Trends.
- Mohn, E. (2015). Augmented Reality. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=ers&AN=87323326> OP - Salem Press Encyclopedia of Science, 2015. 2p.
- Nielsen, J. (2000). Why You Only Need to Test with 5 Users. Retrieved from <https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/>
- Nogueira, T. (2009). *REDES DE COMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL*.
- Rosenberg, J., & Mateos, A. (2010). *The Cloud at Your Service* (1st ed.). Greenwich, CT, USA: Manning Publications Co.
- Soares, T. A. C., & Mariano, S. J. P. S. (2012). Controlo e automação: sistema de rega inteligente. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsrca&AN=rcaap.openAccess.10400.6.2408>
- Souza, R. B. de, & Medeiros, A. A. D. de. (2005). Uma arquitetura para sistemas supervisórios industriais e sua aplicação em processos de elevação artificial de petróleo. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=edsrca&AN=rcaap.portugal.123456789.15444>
- Sowinski, L. L. (2017). The case for automation: industry experts weigh in on the steps to take and the benefits of greater warehouse automation.
- Strawn, G. (2014). Masterminds of the Arpanet. *IT Professional*, 16(3), 66–68. <https://doi.org/10.1109/MITP.2014.32>

ANEXOS

		Utilizador1
q1	Reação á interface de forma geral:	
	Difícil ou fácil de usar?	Fácil
	Frustrante ou satisfatória?	Satisfatória
	Aborrecida de usar ou estimulante?	Estimulante
q2	Organização da interface e terminologia:	
	Ler a informação que a mesma disponibiliza é difícil ou fácil?	Fácil
	Organização da informação/funcionalidades está confusa ou clara?	Confusa
	Termos usados no sistema estão consistentes ou inconsistentes?	Consistentes
q3	Aprendizagem do sistema:	
	Aprender a operar o sistema é difícil ou fácil?	Fácil
	Executar tarefas é simples ou complexo?	Simples
q4	Capacidades do sistema:	
	Velocidade do sistema é lenta ou rápida?	Rápida
	O Sistema é confiável ou não confiável?	Confiável
q5	Que capacidades do sistema melhoram a operação das tarefas?	Poder fazer ajustes pontuais a parâmetros em tempo real
q6	Que dificuldades encontra na utilização da interface?	-
q7	Alguma sugestão de melhoria?	1)Avaliar possibilidade de dividir tabs inferiores na vertical 2)Possibilidade de criar sub-menu que se "esconde" para fazer os ajustes das tabs inferiores (aquecimento, parâmetros, outros...) 3)Guardar histórico de linhas Gcode inseridas via MDI

Figura A 1 – Questionário ao Utilizador 1

		Utilizador2
q1	Reação á interface de forma geral:	
	Difícil ou fácil de usar?	Fácil
	Frustrante ou satisfatória?	Satisfatória
	Aborrecida de usar ou estimulante?	Estimulante
q2	Organização da interface e terminologia:	
	Ler a informação que a mesma disponibiliza é difícil ou fácil?	Fácil
	Organização da informação/funcionalidades está confusa ou clara?	Clara
	Termos usados no sistema estão consistentes ou inconsistentes?	Consistentes
q3	Aprendizagem do sistema:	
	Aprender a operar o sistema é difícil ou fácil?	Fácil
	Executar tarefas é simples ou complexo?	Simples
q4	Capacidades do sistema:	
	Velocidade do sistema é lenta ou rápida?	Rápida
	O Sistema é confiável ou não confiável?	Confiável
q5	Que capacidades do sistema melhoram a operação das tarefas?	A organização da informação e funcionalidades está customizada ao processo de impressão 3D, o facto de ter como primeiro bloco de informação aquela que é mais importante permite perceber mais facilmente em tempo real o que está a acontecer no processo.
q6	Que dificuldades encontra na utilização da interface?	Alguma falta de espaço nas tabs inferiores.
q7	Alguma sugestão de melhoria?	1)Avaliar necessidade de ter botão de emergência na interface 2)Caixa de texto para input de um valor (posição para onde queremos enviar o eixo) e o eixo move-se enquanto o botão do mesmo é pressionado (comportamento idêntico ao "Send To") 3)Eixo C varia entre 0 e 360. O "0" será sempre ao início da máquina? 4)Eixos XYZ em mm e eixos B e C em graus

Figura A 2 - Questionário ao Utilizador 2

		Utilizador3
Q1	Reação á interface de forma geral:	
	Difícil ou fácil de usar?	Fácil
	Frustrante ou satisfatória?	Satisfatória
	Aborrecida de usar ou estimulante?	Estimulante
Q2	Organização da interface e terminologia:	
	Ler a informação que a mesma disponibiliza é difícil ou fácil?	Fácil
	Organização da informação/funcionalidades está confusa ou clara?	Clara
	Termos usados no sistema estão consistentes ou inconsistentes?	Consistentes
Q3	Aprendizagem do sistema:	
	Aprender a operar o sistema é difícil ou fácil?	Fácil
	Executar tarefas é simples ou complexo?	Simples
Q4	Capacidades do sistema:	
	Velocidade do sistema é lenta ou rápida?	Rápida
	O Sistema é confiável ou não confiável?	Confiável
Q5	Que capacidades do sistema melhoram a operação das tarefas?	O modo de operação "Manual" permite facilitar o processo de manutenção do equipamento, por exemplo movendo os eixos para determinadas zonas de forma a ser possível aceder manualmente a outras.
Q6	Que dificuldades encontra na utilização da interface?	-
Q7	Alguma sugestão de melhoria?	1)Evitar o scroll, mas se necessário ter 1 scroll (pouco) também é viável. 2)Tentar arranjar tabs inferiores de forma a organizar melhor a informação

Figura A 3 - Questionário ao Utilizador 3

		Utilizador4
Q1	Reação á interface de forma geral:	
	Difícil ou fácil de usar?	Fácil
	Frustrante ou satisfatória?	Satisfatória
	Aborrecida de usar ou estimulante?	Estimulante
Q2	Organização da interface e terminologia:	
	Ler a informação que a mesma disponibiliza é difícil ou fácil?	Fácil
	Organização da informação/funcionalidades está confusa ou clara?	Clara
	Termos usados no sistema estão consistentes ou inconsistentes?	Consistentes
Q3	Aprendizagem do sistema:	
	Aprender a operar o sistema é difícil ou fácil?	Fácil
	Executar tarefas é simples ou complexo?	Simples
Q4	Capacidades do sistema:	
	Velocidade do sistema é lenta ou rápida?	Rápida
	O Sistema é confiável ou não confiável?	Confiável
Q5	Que capacidades do sistema melhoram a operação das tarefas?	O facto de ter como primeiro bloco de informação toda a informação mais relevante (eixos, velocidades e temperaturas) para um processo de impressão facilita uma compreensão dos parâmetros mais rápida e por sua vez uma atuação do operador também mais rápida.
Q6	Que dificuldades encontra na utilização da interface?	-
Q7	Alguma sugestão de melhoria?	<p>1)Coluna Duração no Histórico.</p> <p>2)Para todas as velocidades: ter botão 100% para voltar á velocidade inicial após esta ter sido alterada durante a impressão.</p> <p>3)Jogo de cores (verde, vermelho, etc) nas informações que tenham atual vs desejada (temperaturas)</p> <p>4)Expandir linhas de código G (para 20, 25..) para verificar se é versão correta do ficheiro a executar, por exemplo.</p>

Figura A 4 - Questionário ao Utilizador 4