

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Formação em soldadura com recurso à gamificação e realidade virtual

Pedro Liberal Lima



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Marcelo Roberto Petry

28 de julho de 2025

Resumo

A soldadura é uma atividade essencial a diversas indústrias, sendo fundamental garantir a formação adequada de novos profissionais qualificados. No entanto, tem sido observada uma falta de profissionais qualificados e envelhecimento da força de trabalho. A formação em soldadura enfrenta diversos desafios, como elevados custos operacionais, riscos associados à prática e escassez de instrutores. Como resultado, tem havido uma necessidade crescente de formação de novos soldadores qualificados. Estão, cada vez mais, a ser explorados métodos alternativos para formar futuros profissionais, com o objetivo de melhorar a aprendizagem, reduzir o tempo de treino e diminuir as despesas associadas. A introdução de tecnologias nas áreas da Realidade Virtual e Realidade Aumentada na formação de soldadura tem sido amplamente reconhecida pelo seu enorme potencial. Neste contexto, esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um simulador de soldadura em Realidade Virtual, com o objetivo de apoiar a formação de novos soldadores de forma segura, acessível e personalizada.

Partindo de um simulador previamente desenvolvido no INESC TEC, foram adicionadas diversas funcionalidades, como guia de apoio em tempo real, monitorização de progresso e parâmetros de soldadura, bem como a geração automática de relatório de desempenho do utilizador. O sistema foi validado através da realização de testes com utilizadores, que permitiram recolher dados quantitativos sobre o desempenho técnico dos participantes e dados qualitativos sobre a perceção da usabilidade e carga de trabalho do simulador. Os resultados demonstraram que o simulador contribui para uma melhoria no desempenho e apresenta uma elevada aceitação por parte dos utilizadores, tendo sido obtida uma pontuação de 86,67 em 100 no *System Usability Scale*.

Os resultados desta investigação revelam que a tecnologia de Realidade Virtual apresenta um potencial promissor como ferramenta complementar na formação em soldadura, embora este papel deva ser explorado com maior profundidade em estudos futuros para assegurar a sua eficácia. Apesar da elevada aceitação por parte dos utilizadores, considera-se apropriado realizar investigações adicionais que permitam validar o sistema e avaliar de forma robusta a sua aplicação em contextos reais de formação.

Abstract

Welding is an essential activity across various industries, making the proper training of new skilled professionals a priority. However, a shortage of skilled workers and an aging workforce have been observed. Welding training faces numerous challenges, such as high operational costs, risks associated with the practice, and a shortage of experienced instructors. As a result, there is an increasing need to train new qualified welders. Alternative training methods are being explored to enhance learning, reduce training time, and lower associated costs. The integration of technologies such as Virtual Reality and Augmented Reality in welding education has been widely recognized for its potential. In this context, this dissertation presents the development of a VR-based welding simulator aimed at supporting the training of future welders in a safer, more accessible, and personalized manner.

Building upon a previously developed simulator at INESC TEC, several functionalities were added, including a real-time instructional guide, monitoring of welding progress and parameters, and the automatic generation of user performance reports. The system was validated through user testing, which enabled the collection of quantitative data on participants' technical performance and qualitative data regarding usability perception and workload. The results showed that the simulator contributed to improved performance and was well-received by users, achieving a score of 86.67 out of 100 on the System Usability Scale.

The results of this investigation reveal that Virtual Reality technology shows promising potential as a complementary tool in welding training, although this role should be explored in greater depth in future studies to ensure its effectiveness. Despite the high level of user acceptance, it is considered appropriate to carry out further research to validate the system and robustly assess its application in real training contexts.

ONU Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) fornecem um enquadramento global para alcançar um futuro melhor e mais sustentável para todos. Inclui 17 objetivos destinados a enfrentar os desafios mais urgentes do mundo, como a pobreza, a desigualdade, as alterações climáticas, a degradação ambiental, a paz e a justiça.

No contexto do trabalho desenvolvido nesta dissertação, que consistiu no desenvolvimento de um simulador de soldadura em Realidade Virtual, foram identificados quatro Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com os quais o projeto se alinha. Esta ligação decorre do contributo da solução proposta para a promoção de práticas inovadoras na formação técnica, a redução de riscos e desperdícios associados ao treino prático tradicional e a capacitação profissional de novos soldadores. Os objetivos identificados são os seguintes:

ODS 4 Assegurar uma educação inclusiva, equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos

ODS 8 Promover um crescimento económico sustentado, inclusivo e sustentável, o emprego pleno e produtivo e o trabalho digno para todos

ODS 9 Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação

ODS 12 Assegurar padrões de consumo e de produção sustentáveis

ODS	Meta	Contribuição	Indicadores de desempenho e métricas
4	4.4	O simulador em realidade virtual contribui para aumentar o número de jovens e adultos com competências técnicas relevantes para o emprego e empreendedorismo.	Número de utilizadores capacitados com o simulador; taxa de retenção e progresso na aprendizagem prática.
	4.7	Promove metodologias pedagógicas inovadoras, acessíveis e inclusivas, apoiadas por tecnologia imersiva.	Avaliação da eficácia pedagógica; feedback positivo dos utilizadores; aceitação em contextos de formação técnica.
8	8.2	Estimula a produtividade económica ao introduzir inovação tecnológica nos processos de formação técnica.	Comparação da eficiência de aprendizagem entre métodos tradicionais e simulação em VR.
	8.6	Apoia a empregabilidade de jovens ao reduzir o tempo e os custos de formação de soldadores.	Redução do tempo médio de treino; aumento da taxa de inserção profissional após formação com o simulador.
9	9.5	Fomenta a investigação e o desenvolvimento de tecnologias aplicadas ao ensino técnico e profissional.	Desenvolvimento de novas funcionalidades; publicações e relatórios técnicos associados ao projeto.
	9.4	Apoia a modernização tecnológica da formação industrial através de soluções digitais sustentáveis.	Grau de adoção do simulador em instituições; redução de materiais físicos utilizados na formação.
12	12.2	Contribui para a gestão eficiente de recursos na formação, reduzindo o consumo de materiais e energia.	Estimativa de poupança de consumíveis; redução de desperdício em contextos práticos.
	12.5	Ajuda a minimizar resíduos associados à formação em soldadura tradicional através da substituição por ambientes virtuais.	Comparação de resíduos produzidos antes/depois da implementação do simulador; impacto ambiental evitado.

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, instituição de excelência onde tive a oportunidade de crescer académica e pessoalmente ao longo destes últimos anos.

Agradeço igualmente ao Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência, pela forma como me acolheu e proporcionou as condições ideais para o desenvolvimento desta dissertação, num ambiente estimulante e profissional.

Ao meu orientador, o Doutor Marcelo Petry, expresso um agradecimento muito especial pela sua orientação rigorosa, pela disponibilidade constante e pelas valiosas orientações fornecidas ao longo de todo o processo. O seu acompanhamento foi essencial para a concretização deste trabalho. Agradeço também ao Mestre Manuel Couto pelo apoio prático e pelas sugestões pertinentes que contribuíram positivamente em várias fases do projeto. Reconheço ainda o contributo do Vítor Santos pela produção do vídeo que acompanha esta dissertação, o que representou uma mais-valia na comunicação do trabalho desenvolvido.

Por fim, reservo um agradecimento profundo à minha família, que foi o alicerce inabalável durante todo este percurso, oferecendo apoio emocional, motivação e compreensão mesmo nos momentos de maior exigência. Aos meus amigos e aos meus colegas de equipa de basquetebol, deixo igualmente um enorme obrigado pela amizade, encorajamento e pela capacidade de me fazerem sorrir, mesmo nos dias mais desafiantes. O vosso apoio fez toda a diferença.

Pedro Liberal Lima

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Definição do Problema	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Fundamentação Teórica e Estado da Arte	4
2.1	Soldadura	4
2.1.1	Processos de Soldadura	4
2.2	Realidade Virtual e Realidade Aumentada	11
2.2.1	Realidade Virtual	11
2.2.2	Realidade Aumentada	12
2.2.3	Simuladores de soldadura existentes	13
2.3	Conclusões	15
3	Simulador de Soldura em Realidade Virtual	17
3.1	<i>Software</i> de Desenvolvimento	17
3.2	Integração de Realidade Virtual com Unity	18
3.3	Base Inicial do Projeto	23
3.4	Monitorização do Progresso da Soldadura	26
3.5	Captura de Parâmetros de Soldadura	29
3.6	Demonstração e Guia de Soldadura	32
3.7	Análise Estatística dos Parâmetros de Soldadura	36
3.8	Sistema de Repetição das Ações do Utilizador	37
3.9	Visualização Gráfica dos Parâmetros de Soldadura	39
3.10	Geração de um Relatório de Avaliação de Soldadura	42
3.11	Interface do Utilizador	44
3.12	Conclusões	51
4	Testes, Resultados e Discussão	52
4.1	Testes	52
4.2	Resultados	55
4.3	Discussão	62
4.4	Conclusão	64
5	Conclusões e Trabalho Futuro	65
5.1	Satisfação dos Objetivos	65
5.2	Trabalho Futuro	66
	Referências	67

A Formulário Utilizado nos Testes

71

Lista de Figuras

2.1	Material para a soldadura GTAW [39]	6
2.2	Material para a soldadura GMAW [39]	7
2.3	Subprocesso de soldadura FCAW[39]	9
2.4	Material para a soldadura SMAW [39]	10
2.5	Representação simplificada do <i>virtuality continuum</i> [27]	11
2.6	Simulador AugmentedArc [24]	14
3.1	Estrutura geral do sistema	19
3.2	HTC Vive Pro 2 [10]	20
3.3	Integração de cenas, <i>GameObjects</i> e componentes no Unity	22
3.4	Base inicial do projeto	24
3.5	Tocha MIG/MAG em funcionamento	25
3.6	Esquema peça tipo T	26
3.7	Peça tipo T no criada no Unity	27
3.8	Linha de <i>triggers</i> e área de um <i>trigger</i>	27
3.9	<i>Trigger</i> inicial e <i>trigger</i> final	28
3.10	Ângulo de trabalho e ângulo de deslocamento numa peça em junta T [46]	30
3.11	<i>Transform</i> da peça T	31
3.12	Holograma de demonstração e guia	33
3.13	Modo de demonstração	34
3.14	Modo com guia	35
3.15	Modo sem guia	35
3.16	Holograma de repetição	38
3.17	Sistema de repetição em funcionamento	39
3.18	Gráfico do parâmetro distância à peça	43
3.19	Excerto do ficheiro JSON contendo o relatório de avaliação de soldadura	44
3.20	Posicionamento da tela da interface do utilizador	45
3.21	Painel 1: Escolha da demonstração	46
3.22	Painel 2: Demonstração	47
3.23	Painel 3: Escolha de guia de soldadura	47
3.24	Painel 4: Processo de soldadura em execução	48
3.25	Painel 5: Solda completa	49
3.26	Locais com solda em falta	49
3.27	Painel 6: Detalhes de parâmetro de soldadura	50
3.28	Painel 7: Gráfico de parâmetro de soldadura	50
3.29	Diagrama de evolução da interface do utilizador	51
4.1	Distribuição da faixa etária e nível de escolaridade dos participantes por grupo	55

4.2	Distribuição de género dos participantes	57
4.3	Experiências dos participantes	58
4.4	Parâmetros registados por participante – comparação com e sem guia	60
4.5	Distância média à peça por participante – comparação com e sem guia	61

Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e limitações do processo de soldadura GTAW (Adaptado de [37, 18]) .	7
2.2	Vantagens e limitações do processo de soldadura GMAW (Adaptado de [37, 18])	8
2.3	Vantagens e limitações do processo de soldadura FCAW (Adaptado de [18]) . . .	10
2.4	Vantagens e limitações do processo de soldadura SMAW (Adaptado de [18]) . . .	10
2.5	Características dos diferentes simuladores de soldadura disponíveis no mercado .	15
4.1	Resumo dos Dados Demográficos dos Participantes	56
4.2	Resumo estatístico dos parâmetros de soldadura registados nos testes	59
4.3	Estatísticas das respostas qualitativas por grupo (escala de 1 a 5)	61
4.4	Estatísticas das respostas ao NASA TLX	62
4.5	Estatísticas das respostas ao SUS	63

Abreviaturas e Símbolos

AR	Realidade Aumentada
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
ELA	Autoridade Europeia do Trabalho
EPI	Equipamento de proteção individual
FCAW	<i>Flux-cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
GPU	Unidade de processamento Gráfico
HLSL	<i>High-Level Shader Language</i>
HMD	<i>Head Mounted Display</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
SPH	<i>Smooth-Particle Hydrodynamics</i>
SUS	<i>System Usability Scale</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TLX	<i>Task Load Index</i>
UE	União Europeia
VR	Realidade Virtual
XR	<i>Extended Reality</i>

Capítulo 1

Introdução

A soldadura tem sido um processo essencial nas indústrias de fabrico e manufatura há milhares de anos, sendo a soldadura de forja o único processo tecnologicamente disponível durante muitos séculos. No final do século XIX, quando a tecnologia permitiu o desenvolvimento de novas técnicas de soldadura, como a soldadura por resistência e a soldadura de arco, tornou-se um elemento imprescindível ao setor produtivo [43]. Algumas das áreas onde este processo é indispensável e não funcionariam sem ele incluem os transportes ferroviários, a construção aeroespacial e naval, o ramo automóvel, a indústria de manufatura, as obras de construção e infraestruturas, bem como a exploração de petróleo e gás. Como se trata de uma componente essencial em diversos contextos industriais, a formação de soldadores qualificados e competentes continua a ser uma prioridade [21].

1.1 Definição do Problema

Embora a soldadura seja cada vez mais importante em todos os tipos de indústria, o número de soldadores qualificados tem vindo a diminuir. Segundo o "Report on labour shortages and surpluses 2023" realizado pela Autoridade Europeia do Trabalho (ELA) da União Europeia (UE) a profissão de soldador foi identificada por 21 países da UE como uma ocupação com escassez de mão de obra e com uma taxa de severidade de 38%, sendo o trabalho que mais países identificaram como tendo uma escassez de trabalhadores [1]. De acordo com o relatório, desde 2017 que a profissão de soldador tem vindo a ser reconhecido por vários países da UE como um dos três empregos que apresenta um número reduzido de trabalhadores, tendo chegado à primeira posição em 2023 [1]. Não só o número de soldadores qualificados está a diminuir, mas também a força de trabalho está a envelhecer, o que significa que grande parte deles deixará de trabalhar em breve, tornando a formação de novos soldadores qualificados crucial. A atividade de soldadura é fisicamente muito exigente, é difícil e cara de aprender e está associada a muitos riscos, tornando-se assim uma atividade pouco procurada para ser aprendida e escolhida como uma carreira a seguir [21]. Os riscos da soldadura não são apenas os riscos iminentes à atividade como, por exemplo, o risco de queimaduras graves devido às temperaturas elevadas do processo de soldadura, risco de choque

elétrico, risco de incêndio e explosão, mas também riscos associados à exposição prolongada a gases e fumos que podem levar ao desenvolvimento de doenças graves do sistema respiratório, tendo potencial para levar ao desenvolvimento de cancro, e exposição a radiação ultravioleta, que pode levar ao desenvolvimento de doenças de pele e lesões oculares. Com o número elevado de riscos que podem surgir durante a prática da atividade de soldadura, uma formação de qualidade e que tem em conta os riscos e as formas mais adequadas para os minimizar é crucial.

Um dos grandes obstáculos que necessita de ser ultrapassado pelos líderes da indústria de soldadura e os instrutores de soldadura é a dificuldade da formação tradicional em soldadura que é inerente à sua natureza. A formação clássica em soldadura é realizada através de aulas teóricas em ambiente de sala de aula onde inicialmente os alunos aprendem os diferentes processos de soldadura, as diferentes máquinas e equipamentos, o equipamento de proteção individual (EPI), os protocolos de segurança, técnicas de soldadura e parâmetros de soldadura [21]. Quando os alunos já estão familiarizados com os conceitos principais de soldadura, começam a parte prática da aprendizagem em ambiente de oficina. É geralmente pedido aos alunos que realizem soldaduras através de um processo específico com uma configuração específica [21]. O instrutor indica-lhes onde devem melhorar e corrige os erros cometidos. Até o aluno obter consistentemente soldas de qualidade alta continua a realizar soldas consoante as instruções que lhe forem dadas. Um dos grandes problemas da formação em soldadura é o elevado custo, não só o custo de todo o material necessário para realizar a aprendizagem, o metal (e.g., ferro, alumínio, titânio, cobre), o gás natural, a solda e as máquinas e equipamentos necessários, mas também o custo de manutenção das máquinas, que é necessário fazer de forma regular e o custo de trabalho dos instrutores. Como o tempo de formação de um soldador é elevado porque necessitam de ter várias horas de experiência antes de estarem prontos para iniciar a trabalhar o custo total de formação de um soldador é considerável [21].

1.2 Objetivos

Uma das soluções para mitigar os riscos e reduzir os custos inerentes à formação em soldadura é a utilização de Realidade Virtual (VR) e Realidade Aumentada (AR) de forma a complementar parte da componente prática da aprendizagem. O objetivo desta dissertação é a realização de um jogo em realidade virtual para apoiar a formação na área da soldadura, utilizando um simulador de soldadura previamente desenvolvido no Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC). O jogo não só servirá como ferramenta de treino de soldadura, disponibilizando ao soldador diferentes desafios com variados níveis de dificuldade, mas também classificará a prestação do utilizador através da monitorização dos movimentos realizados pelo soldador. Com o objetivo principal em mente, o trabalho foi dividido em subobjetivos com o intuito de melhor compreender as tarefas necessárias a realizar e a sua cronologia:

- Levantamento de metodologias de ensino de soldadura;
- Configuração do equipamento e das ferramentas de desenvolvimento;

- Estudo e implementação de experiências virtuais com diferentes graus de dificuldade;
- Estudo e implementação de alertas visuais/sonoros para auxílio do aprendiz;
- Estudo e implementação de algoritmos para avaliação e *feedback* do aprendiz;
- Teste e validação do sistema desenvolvido no iiLab/INESC TEC.

Com a realização desta dissertação espera-se obter uma maneira alternativa para a formação de soldadores que pretende através do uso de realidade virtual tornar a aprendizagem prática de soldadura mais interativa e eficiente ao mesmo tempo que os riscos e os custos envolvidos com a prática de soldadura são significativamente diminuídos. O trabalho também tem como intenção combater a falta de instrutores disponíveis através do fornecimento de guias, alertas e *feedback* específico ao utilizador e à sua prestação. Com o fornecimento desta informação a cada utilizador a aprendizagem torna-se personalizada, podendo ajudar a combater as dificuldades de cada um, diminuindo assim o tempo necessário para o utilizador se tornar um soldador competente e com elevado grau de habilidade. É esperado que o simulador diminua simultaneamente os custos e o tempo de formação em soldadura, combatendo as atuais dificuldades da aprendizagem tradicional em soldadura.

1.3 Estrutura da Dissertação

O documento da dissertação está organizado em cinco capítulos. No presente Capítulo 1 correspondente à Introdução, são apresentados o contexto e enquadramento do problema, a motivação do trabalho e os objetivos definidos. No Capítulo 2, Fundamentação Teórica e Estado da Arte, apresenta os conceitos necessários para o entendimento do trabalho, incluindo uma análise dos diferentes processos de soldadura, das tecnologias de Realidade Virtual e Realidade Aumentada e dos diferentes simuladores de soldadura atualmente disponíveis. O Capítulo 3 é dedicado ao Simulador de Soldadura em Realidade Virtual, onde é descrito em detalhe o *software* e *hardware* utilizados, a arquitetura do sistema, os seus diferentes módulos funcionais e os mecanismos de apoio à aprendizagem integrados no simulador. O Capítulo 4, Testes, Resultados e Discussão, apresenta o processo de validação do simulador através de testes práticos com utilizadores, os dados quantitativos e qualitativos recolhidos e uma análise crítica dos resultados. Por fim, no Capítulo 5 de Conclusões e Trabalho Futuro, é realizada uma reflexão sobre o cumprimento dos objetivos propostos e uma apresentação de possíveis propostas de desenvolvimento e aplicação do simulador em futuros contextos.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica e Estado da Arte

Este capítulo tem como finalidade introduzir ao leitor uma revisão de temas abordados na dissertação de forma a permitir um melhor entendimento do trabalho realizado. Neste capítulo é explorada a soldadura e os diferentes processos que existem na atualidade, os conceitos de Realidade Virtual e Realidade Aumentada e os diferentes tipos de produtos atualmente no mercado que permitem a utilização desta tecnologia para a formação em soldadura.

2.1 Soldadura

Existem muitas atividades essenciais à indústria atual. Uma dessas atividades é a soldadura. A soldadura é o processo de junção localizada de dois materiais de forma permanente. Existem vários tipos de processos que permitem esta união entre materiais. A estes processos chama-se processos de soldadura, e eles têm evoluído ao longo dos anos à medida que os avanços tecnológicos o permitiram. Embora apenas no final do século XIX tenham surgido os principais processos de soldadura atualmente utilizados na indústria, a soldadura já existe desde a Idade do Bronze, há mais de 4000 anos, onde o único processo de soldadura existente era o processo de forjamento realizado pelo aquecimento de metal que era posteriormente trabalhado por um ferreiro para alterar a sua forma para a forma desejada [43].

2.1.1 Processos de Soldadura

No final do século XIX, quando se tornou possível gerar corrente elétrica suficientemente elevada surgiram novos processos de soldadura, a soldadura por resistência elétrica e a soldadura por arco [43]. Outro processo de soldadura que surgiu foi a soldadura por combustão, que gera calor suficiente para unir dois materiais, através das temperaturas elevadas geradas pela ignição de um gás inflamável com um gás comburentes. Existem ainda mais processos de soldadura, como, por exemplo, o processo de soldadura por feixe de eletrões e a soldadura por fricção, cada um com

os seus pontos positivos e negativos, cabendo, assim, ao soldador escolher aquele que melhor se adequa à situação em específico.

Os processos que serão o foco desta dissertação serão diferentes tipos de processos por arco elétrico. A soldadura por arco é feita pela descarga elétrica entre dois eletrodos que cria um arco elétrico. A corrente é conduzida do eletrodo da ponta da máquina de soldar para a peça de trabalho através de um gás aquecido e ionizado, a que se chama plasma. A potência elétrica libertada pelo arco elétrico é determinada pela sua tensão e corrente. É a elevada temperatura gerada por esse arco que provoca a fusão do eletrodo, originando um banho de fusão que, ao arrefecer, une os materiais que se pretendem juntar. Por essa razão a potência deverá ser alta o suficiente para manter a temperatura elevada para que a constante ionização do gás não seja interrompida, pois são as partículas eletricamente carregadas deste gás que permitem a passagem de corrente e continuidade do arco para a soldadura decorrer sem interrupção [43].

A exposição a gases existentes no ar, como o oxigénio, o nitrogénio e o vapor de água tem efeitos negativos na soldadura que diminuem a sua qualidade e a dificultam a sua realização. Para minimizar os efeitos do ar durante o processo de soldadura podem ser utilizados gases de proteção que envolvem a soldadura e impedem os gases do ar de influenciarem negativamente o trabalho. Os gases escolhidos para esta tarefa devem ser pouco reativos, portanto são geralmente escolhidos gases inertes ou ativos. A escolha do gás de proteção tem influência na temperatura necessária para manter o plasma ionizado. Por exemplo, o argon é mais fácil de ionizar do que o hélio, logo soldar em hélio ou gases misturados com hélio provocam uma maior queda de tensão e maior temperatura de entrada no banho de fusão [43]. Alguns processos de soldadura em arco utilizam gases de proteção, mas nem sempre, até um mesmo processo pode ou não utilizar estes gases para proteger a soldadura do ar.

Alguns processos de soldadura em arco apresentam um eletrodo consumível, o que significa que o arco passa a apresentar duas funções. A primeira continua a ser derreter os materiais, a segunda é transportar o eletrodo consumível derretido para o banho de fusão. A deposição do eletrodo consumível depende significativamente das forças eletromagnéticas e tensão superficial na região do arco. A distinção entre diferentes tipos de processos de soldadura em arco é feita através do comportamento da soldadura que estas forças provocam [43].

Soldadura GTAW

A soldadura GTAW (sigla em inglês de *Gas Tungsten Arc Welding*), também conhecida por soldadura TIG (sigla em inglês de *Tungsten Inert Gas*) é um processo de soldadura em arco que consiste em criar um arco elétrico entre um eletrodo de tungsténio não consumível e o material de trabalho. Este processo utiliza corrente contínua (CC), onde o eletrodo de tungsténio não consumível está ligado ao pólo positivo, ou ao pólo negativo, apesar de na maioria das aplicações se encontrar ligado ao pólo negativo. Corrente alternada (CA) também pode ser utilizada de modo a obter diferentes efeitos na soldadura [37]. A utilização de frequências altas de corrente contínua permite uma iniciação "sem toque" do arco elétrico, que é uma vantagem na produção de soldas de elevada qualidade [37]. A soldadura TIG utiliza gás de proteção, normalmente o argon, que sai

da ponta da pistola de solda onde o eletrodo está centrado. Como o eletrodo de tungsténio é não consumível, geralmente, o soldador insere ao longo da solda um metal de adição, normalmente na forma de um arame fino, que derrete para o banho de fusão enquanto controla com a outra mão a pistola de solda [43]. Este processo de soldadura é mais adequado para um ambiente de oficina fechado e não para um ambiente exterior, pois o movimento do ar deve ser menor do que 8 km/h de modo a manter a proteção do gás inerte [39]. A figura 2.1 apresenta o esquemático do material utilizado para a soldadura GTAW.

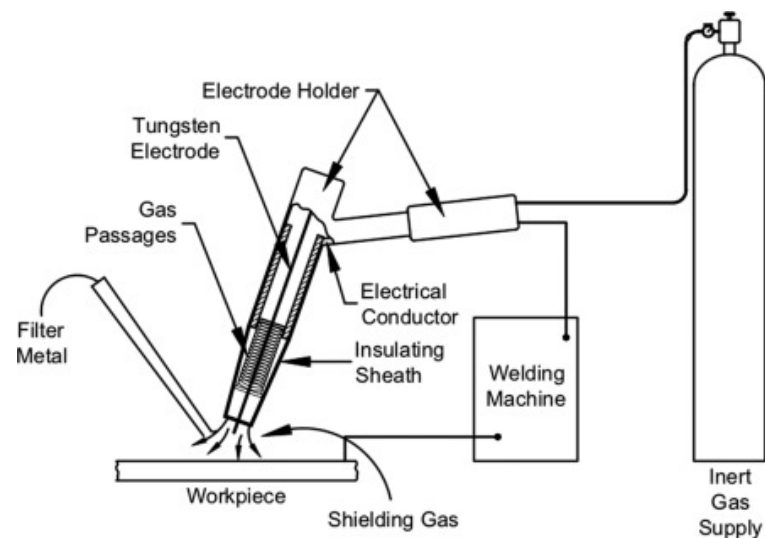


Figura 2.1: Material para a soldadura GTAW [39]

O processo de soldadura GTAW é realizado geralmente de forma manual, mas existem processos automáticos para soldadura de canos e tubos de elevada qualidade. O processo manual é um processo que, geralmente, requer o uso das duas mãos, exige elevada habilidade e experiência do soldador [39].

O processo de soldadura GTAW permite a realização de soldas de elevada qualidade e, se bem realizadas, livres de defeitos. Este processo não cria escória de solda (material não metálico indesejado resultante da soldadura, pois previne o contacto entre o material metálico e a solda) e se a solda for bem mantida pode ficar livre de qualquer tipo de inclusões de materiais não desejados, como inclusões de tungsténio [37]. Uma das principais limitações deste processo é o facto de a velocidade a que se realiza é baixa comparativamente com outros processos, não sendo recomendada para soldaduras de grandes dimensões. Na tabela 2.1 estão apresentadas as vantagens e limitações do processo de soldadura GTAW.

Soldadura GMAW

A soldadura GMAW (sigla em inglês de *Gas Metal Arc Welding*), também conhecido pelos seus dois subtipos, soldadura MIG (sigla em inglês de *Metal Inert Gas*) e soldadura MAG (sigla em inglês de *Metal Active Gas*), é um processo de soldadura em arco elétrico que usa um eletrodo consumível em forma de arame, que vai automaticamente saindo pela ponta da pistola de soldadura

Tabela 2.1: Vantagens e limitações do processo de soldadura GTAW (Adaptado de [37, 18])

Vantagens	Limitações
Soldas de elevada qualidade	Velocidade de soldadura lenta
Nenhuma presença de escória de solda ou de outro tipo de materiais indesejados	Requer uma maior habilidade por parte do soldador
Controlo preciso das variáveis de soldadura	Necessidade de proteção contra o vento para manter gás inerte em volta da soldadura
Capacidade de soldar quase todos os metais	Risco de contaminação da solda se o gás protetor não for mantido ou se o metal de adição ou metal de base estiverem contaminados
Controlo independente da fonte de calor e do material de adição	
Custo baixo da fonte elétrica necessária	

[39]. Após uma calibração inicial feita pelo soldador, a saída de eletrodo consumível pela ponta da pistola de soldadura é autorregulada [37]. Energia é fornecida para criar e manter um arco entre a ponta do eletrodo consumível e o material de base para os derreter e criar um banho de fusão. Este processo requer a utilização de um gás de proteção, se o gás utilizado for um gás inerte o processo é definido como um processo MIG, se em vez de um gás inerte, for utilizado um gás ativo o processo denomina-se MAG. A figura 2.2 apresenta o esquemático do material utilizado para a soldadura GMAW.

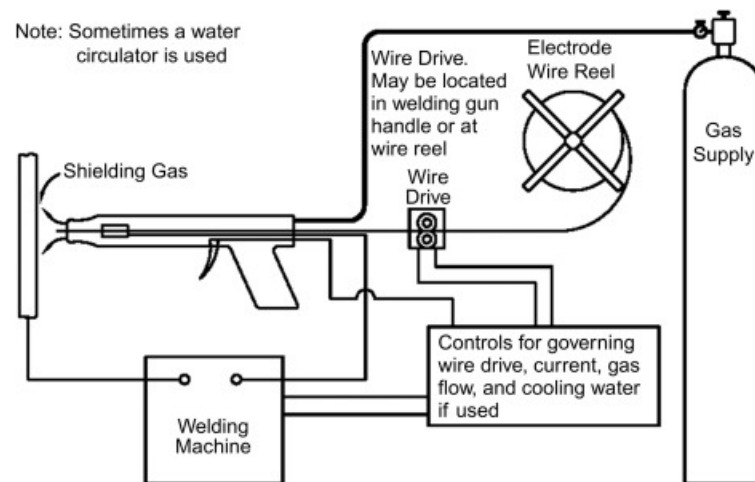


Figura 2.2: Material para a soldadura GMAW [39]

A transferência de metal ao longo do arco pode ser feita das três seguintes maneiras, definidas pela forma como as gotículas de eletrodo consumível caem no material base [37]:

1. A **transferência em curto-circuito** ocorre na gama inferior de correntes e diâmetros de eletrodo. Produz uma solda pequena e de arrefecimento rápido adequado à junção de partes finas e à soldadura fora de posição. Nesta forma de transferência o eletrodo consumível entra em contacto com o banho de fusão entre 20 a 200 vezes por segundo, deixando pequenas

gotículas ao longo da solda. Um componente indutivo é utilizado na fonte de alimentação de modo a controlar a temperatura disponível antes do contacto entre o eléctrodo e o material base que gera curto-circuito [37].

2. A **transferência globular** ocorre em gamas de corrente baixa com hélio e dióxido de carbono como gases constituintes dos gases de proteção da soldadura. Uma gota de grandes dimensões cai facilmente devido à força gravítica e por essa razão este tipo de transferência é, normalmente, apenas utilizado em soldas em superfície plana [37].
3. A **transferência em spray** ocorre quando o nível de corrente é superior à corrente mínima de transição e é uma transferência estável e sem salpicos. Como com o uso deste tipo de transferência o banho de fusão é grande, só pode ser usado em posição de trabalho horizontal ou vertical. O gás de proteção deste tipo de transferência deve ser o argon, ou um gás rico em argon. A fonte de alimentação é uma fonte CC e o eléctrodo tem de ser conectado ao polo positivo da fonte [37].

Os diferentes tipos de transferência de material são obtidos utilizando diferentes níveis de corrente, tensão, e composição do gás de proteção da solda. Na tabela 2.2 estão apresentadas as vantagens e limitações do processo de soldadura GMAW.

Tabela 2.2: Vantagens e limitações do processo de soldadura GMAW (Adaptado de [37, 18])

Vantagens	Limitações
Velocidade de soldadura rápida	Impossibilidade de trabalhar com vento devido à possível perda do gás protetor
Capacidade de soldar todos os materiais	Requer controlo rigoroso do processo
Controlo da temperatura de soldadura	Manutenção trabalhosa
Processo limpo	Limitações nas posições de soldadura consoante o tipo de transferência utilizado

Soldadura FCAW

A soldadura FCAW (sigla em inglês de *Flux-cored Arc Welding*) é um processo em soldadura em arco elétrico muito similar ao processo GMAW, que usa como eléctrodo um arame tubular com diversos materiais em pó no interior, fundente, em vez de arame sólido. A composição dos materiais em pó no interior do arame tubular é diferente entre arames. Durante a soldadura utilizando este processo, uma extensa camada de escória de solda é depositada, que deve ser removida. O modo de transferência em *spray* é o que está geralmente associado a este processo de soldadura, apesar de a transferência globular não ser muito incomum. Este processo é caracterizado por grande quantidade de solda depositada em pouco tempo [43, 39].

Existem dois subprocessos da soldadura FCAW. O primeiro utiliza gases de proteção e está mais direccionado para utilização em oficina, pois o movimento do ar não deve ser suficiente para remover o efeito dos gases. A este sub processo chama-se FCAW com gás protetor (FCAW-G ou

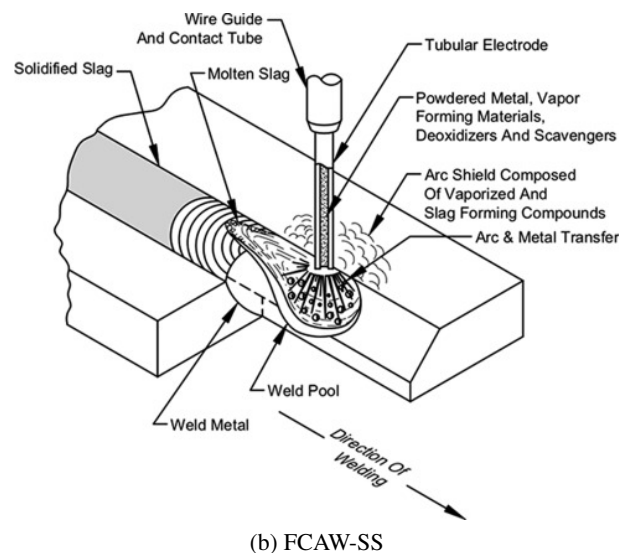
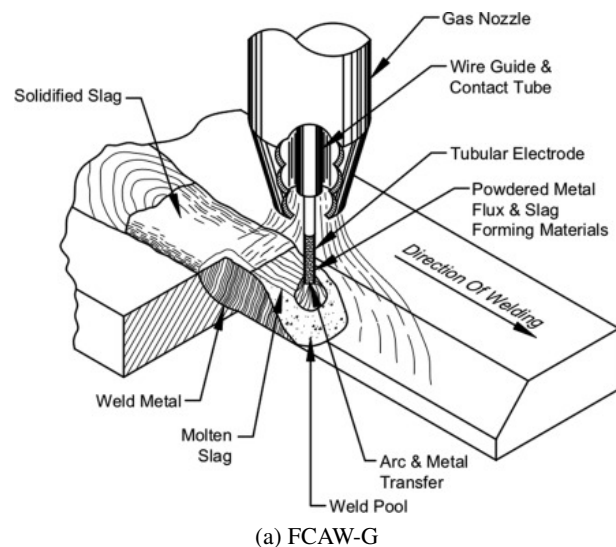


Figura 2.3: Subprocesso de soldadura FCAW[39]

FCAW-S). Existe ainda um sub-processo denominado FCAW-SS (sigla em inglês de *self-shielded Flux-cored Arc Welding*). Este sub-processo não utiliza gases de proteção convencionais. Em vez disso, aproveita os gases que se formam a partir do fluxo presente no interior do arame tubular durante a sua fusão. Estes gases funcionam como agentes de proteção, permitindo a aplicação do processo em ambientes com elevado movimento de ar [39, 37]. A seguinte figura representa esquematicamente os dois sub processos de soldadura FCAW, o sub processo FCAW-G e o sub processo FCAW-SS.

Na tabela 2.3 estão apresentadas as vantagens e limitações do processo de soldadura FCAW.

Tabela 2.3: Vantagens e limitações do processo de soldadura FCAW (Adaptado de [18])

Vantagens	Limitações
Processo simples e fácil de aprender	Escória de solda deve ser removida
Funciona bem em material pintado e enferrujado	Produce grande quantidade de respingos
Pode ser usado em condições ventosas	
Capaz de soldar metais grossos	

Soldadura SMAW

A soldadura SMAW (sigla em inglês de *Shield Metal Arc Welding*) também conhecida por MMA e MMAW (sigla em inglês de *Manual Metal Arc Welding*) e por *Stick welding* é um processo de soldadura em arco elétrico que utiliza um eletrodo consumível revestido de material fundente. O arco elétrico vai derretendo o eletrodo revestido e o material de base criando um banho de fusão que une os materiais pretendidos. O papel do fundente, o material que reveste o eletrodo, é, aquando do seu derretimento, a libertação de gases e criação de escória na solda de forma a esta ficar protegida de contaminação atmosférica. Sendo assim este processo de soldadura está assim compatível tanto para uso em oficina ou em ambiente aberto [43, 39]. Na tabela 2.4 estão apresentadas as vantagens e limitações do processo de soldadura SMAW. A figura 2.4 apresenta o esquemático do material utilizado para a soldadura SMAW.

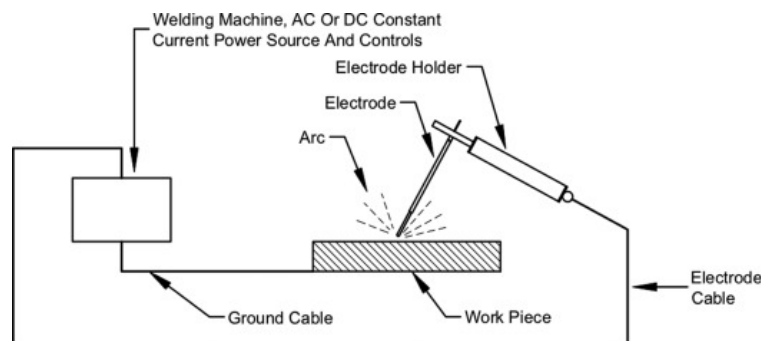


Figura 2.4: Material para a soldadura SMAW [39]

Tabela 2.4: Vantagens e limitações do processo de soldadura SMAW (Adaptado de [18])

Vantagens	Limitações
Processo fácil de aprender	Gera temperatura elevada
Custo reduzido	Difícil de trabalhar com metais finos
Pode ser usado em condições ventosas	Exige mais tempo de trabalho
Capacidade de soldar a maioria dos materiais	

2.2 Realidade Virtual e Realidade Aumentada

Neste trabalho toma-se como ponto de partida, para a definição de temas relacionados com Realidade Aumentada e Realidade Virtual, o conceito de *Reality-Virtuality Continuum*, postulado por Paul Milgram e Fumio Kishino [27] na década de 90. O conceito de *Reality-Virtuality Continuum* relaciona-se com a forma como um conjunto de diversos objetos é exibido numa dada situação, a figura 2.5 ilustra o *continuum* que tem numa das extremidades ambientes totalmente reais e na outra extremidade ambientes totalmente virtuais. No caso de um ambiente totalmente real este é constituído exclusivamente de objetos reais, e inclui, por exemplo, o que é observado num ecrã que transmite aquilo que é capturado por uma câmara ou até mesmo a observação de um espaço físico sem necessidade de recorrer a um ecrã. No caso de um ambiente totalmente virtual este é constituído exclusivamente por objetos virtuais, um exemplo seria uma simulação gráfica convencional por computador, este ambiente é conhecido como Realidade Virtual (VR, do inglês *Virtual Reality*). Entre estes dois extremos, como é possível observar na figura 2.5, existem diversos tipos de ambientes que podem ser experienciados. Alguns apresentam uma predominância de objetos reais em relação aos virtuais, enquanto noutros ocorre o contrário. Um desses ambientes é denominado Realidade Aumentada (AR, do inglês *Augmented Reality*), sendo geralmente caracterizado por um ambiente maioritariamente real que é enriquecido com componentes virtuais [27, 38].

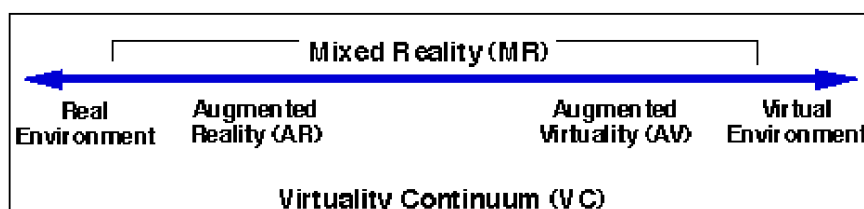


Figura 2.5: Representação simplificada do *virtuality continuum* [27]

2.2.1 Realidade Virtual

A Realidade Virtual é uma tecnologia imersiva que envolve o utilizador num ambiente totalmente virtual, constituído exclusivamente por objetos virtuais. Geralmente, este tipo de tecnologia utiliza um *headset* que cobre os olhos e ouvidos do utilizador, permitindo, através da transmissão de imagem e som, uma imersão praticamente total num ambiente virtual. Para além do *headset* também é frequente a utilização de comandos que permitem interagir com objetos do ambiente virtual. A tecnologia VR foi desenvolvida de forma a criar a sensação de que o utilizador está totalmente imerso num mundo virtual onde todas as ações e interações que realiza com objetos ocorram de forma intuitiva e natural. A tecnologia VR é utilizada em vários tipos de aplicações, sendo os videojogos e o entretenimento as áreas para as quais a maioria destas aplicações são desenvolvidas [14, 25, 31].

A utilização de tecnologia VR com o intuito educacional e de formação tem vindo a aumentar [25]. No ambiente em Realidade Virtual os formandos são capazes de interagir com objetos e o

ambiente que os envolve, vivenciando de uma forma altamente imersiva e interativa a atividade a ser aprendida, que não é possível de ser replicada pelos métodos teóricos tradicionais de aprendizagem, como, por exemplo, os livros e as palestras. A utilização deste tipo de tecnologia tem demonstrado um aumento da motivação e compromisso por parte dos formandos e também um aumento no desempenho, melhores resultados de aprendizagem e uma melhoria nas competências globais e transversais do formando, como, por exemplo, melhoria do pensamento crítico e da resolução de problemas, melhoria na capacidade de comunicação e colaboração dos formandos [14, 25]. A utilização de tecnologia VR também permite ao aprendiz realizar procedimentos e técnicas específicas sem qualquer tipo de riscos e num ambiente totalmente controlado, antes de as realizar de forma prática no mundo real. Este tipo de aprendizagem tem sido utilizada em diversas áreas como, por exemplo, em ambiente académico [25], na indústria [12], na medicina [30] e também para fins militares [19].

Apesar das inúmeras vantagens que a utilização de tecnologia VR para a formação em diversas atividades proporciona, existem vários desafios que necessitam de ser ultrapassados para tornar este tipo de solução acessível ao maior número de pessoas possível. Um desses desafios é o elevado custo do *hardware* necessário, principalmente o *headset* e o computador que permitem a visualização do mundo virtual. Outro obstáculo prende-se com a necessidade de desenvolver sistemas de monitorização, deteção e acompanhamento dos movimentos do utilizador em tempo real, com elevada precisão. Além disso, alguns utilizadores sentem enjoos e desconforto durante a utilização prolongada destes dispositivos, o que representa uma limitação adicional na sua adoção [5].

Com avanços de *hardware* associado à tecnologia VR, principalmente no que diz respeito à qualidade de imagem que os *headset* permitem transmitir e a melhoria de outros tipos de componentes que intensificam a imersão e a vivência no mundo virtual do utilizador, este tipo de interface revela um enorme potencial no que toca à interação da pessoa com conteúdo digital no futuro. A integração com tecnologias emergentes, como a inteligência artificial, amplia ainda mais o leque de aplicações futuras [8].

2.2.2 Realidade Aumentada

A Realidade Aumentada é uma tecnologia em rápido crescimento que realça a perceção de objetos no mundo real através da sobreposição de informação digital. A utilização de câmaras para perceção do ambiente real e a utilização de visão de computador para o reconhecimento e acompanhamento de objetos no mundo real permite enaltecer, com sobreposição de componentes digitais, estes objetos. De uma forma geral, os sistemas que utilizam a tecnologia AR são constituídos por três componentes principais, um dispositivo de transmissão de vídeo, que pode ir desde um *Head Mounted Display*(HMD), até um *smartphone*, um sistema de *tracking* responsável por detetar e seguir o movimento de objetos no mundo real, e uma unidade computacional de processamento de dados responsável pela criação de informação digital que será sobreposta em objetos no mundo real de forma a os enaltecer [14, 12, 25, 23].

Tal como a Realidade Virtual, a adoção de Realidade Aumentada com o intuito educacional e de formação tem vindo a aumentar [25, 48, 14]. A sobreposição de informação digital no mundo real tem suscitado interesse de várias áreas [7, 31, 22, 2, 14]. Na indústria, este tipo de solução pode ser utilizada como guia de apoio a um trabalhador na linha de montagem, sobrepondo imagens das ações que devem ser realizadas [33]. Na medicina, pode ajudar cirurgiões em operações complexas, sobrepondo imagens médicas no corpo do paciente [47]. No setor do turismo, pode ser utilizado para enriquecer a experiência dos visitantes com informação digital sobre espaços e objetos de valor histórico e artístico [6], ou até mesmo no *marketing* por meio de campanhas que cativam o consumidor e o permitem experimentar produtos virtualmente antes de realizar a sua compra [15].

Existem, porém, diversos desafios que necessitam de ser ultrapassados para expandir o acesso a estas aplicações. Muitos dos desafios enfrentados pela AR coincidem com os da VR, como o elevado custo do *hardware*, necessidade de desenvolvimento de sistemas de monitorização e a deteção e acompanhamento precisos dos movimentos do utilizador em tempo real. Acrescem ainda preocupações relativas à segurança e privacidade dos dados recolhidos durante a interação com ambientes aumentados [41, 14]. Da mesma forma que a Realidade Virtual beneficia da constante evolução tecnológica, a Realidade Aumentada também beneficia do surgimento de novas ferramentas e inovações que ajudam a mitigar os desafios associados [48, 8].

2.2.3 Simuladores de soldadura existentes

Para melhor compreender o que se pode esperar de um simulador de soldadura, foi realizada uma pesquisa abrangente sobre diferentes soluções, tanto comerciais como desenvolvidas em contexto académico. Durante a pesquisa foi possível averiguar que grande parte dos simuladores analisados apresentam várias características similares. No que toca ao *hardware*, a grande maioria dos simuladores está associado a um computador dedicado exclusivamente à simulação. Este corre o *software* de simulação correspondente, tornando a utilização destes simuladores mais apropriada para ambientes de oficina de aprendizagem. No entanto, não estão concebidos para serem utilizados de forma portátil. Existem alguma exceções. O WeldVR [13] não está associado ao seu próprio computador dedicado à simulação apenas necessitando da instalação do *software* fornecido numa máquina capaz de o correr. O Portable VR Welding Simulator [26] foi desenvolvido no *KOMAG Institute of Mining Technology* e está especialmente criado para combater o problema de falta de portabilidade dos simuladores existentes no mercado, apenas sendo necessário um conjunto de VR com *headset* e comandos que tenham acesso à Internet, pois o *software* é acedido por *browser*.

Uma das principais distinções que pode ser feita entre os diferentes simuladores é se utilizam tecnologia VR ou AR. No conjunto dos simuladores comercializados não existe um padrão fixo de que tecnologia usar, dos oito que foram analisados, metade utiliza tecnologia VR, enquanto que a outra metade utiliza tecnologia AR. Dos simuladores analisados que foram realizados em âmbito académico, todos utilizaram tecnologia VR (Portable VR Welding Simulator [26], VR based real-time interactive training system [45], Onew360 [44]).



Figura 2.6: Simulador AugmentedArc [24]

Apesar de a tecnologia VR e AR em simuladores estarem muito associadas à utilização de *headsets* como saída de exibição de dados ao utilizador, um dos simuladores pesquisados, o simulador guideWELD [32], não utiliza um *headset* substituindo-o por um monitor tradicional, diminuindo assim a imersão do utilizador, mas diminuindo também os custos para quem adquire o produto.

Os simuladores comparados apresentam comandos personalizados ou peças personalizadas que se acrescentam aos comandos tradicionais associados à tecnologia VR com formatos idênticos aos encontrados em pistolas de soldadura de diferentes tipos de processos de soldadura. Para além dos comandos personalizados, os simuladores também contam com peças de trabalho de diferentes formatos para simular as soldaduras mais comuns e de especial importância para a formação de novos soldadores. Estas peças são de elevada importância nos sistemas que utilizam AR, pois a visão computacional utiliza-as como referência para criar as peças virtuais e mostrá-las ao utilizador, por essa razão nos simuladores que utilizam AR as peças de trabalho apresentam cores e padrões singulares. A figura 2.6 apresenta o simulador AugmentedArc e todo o material que está associado ao produto. Este é um simulador que utiliza tecnologia AR. Como é possível observar, as peças de trabalho apresentam cores e um padrão singular.

Cada simulador apresenta diferentes tarefas de soldadura, que variam não só no formato da peça de trabalho, mas também na sua posição e no processo de soldadura utilizado. Dos processos de soldadura descritos em 2.1.1 apenas quatro dos onze simuladores analisados suportam a totalidade das técnicas referidas. O processo mais amplamente simulado é a soldadura GMAW,

disponível em todos os sistemas avaliados. Por outro lado, o menos representado é o processo FCAW, suportado por um número significativamente inferior de plataformas.

Para além de permitirem a realização de soldadura, todos os simuladores recolhem dados sobre a prestação do utilizador ao longo das simulações, estes dados são utilizados para avaliar o seu desempenho e, em alguns casos, para o guiar em tempo real. No final da simulação os dados recolhidos são utilizados para gerar um relatório da prestação do utilizador. A análise em tempo real de dados e a criação do relatório final são ferramentas importantes para ajudar o utilizador a perceber aquilo que tem de melhorar aquando da realização da soldadura.

Os resultados desta pesquisa encontram-se organizados na tabela 2.5 onde são indicados os diferentes simuladores, o seu proprietário, se usam tecnologia VR ou AR e que tipos de processos de soldadura são possíveis de realizar em cada simulador.

Tabela 2.5: Características dos diferentes simuladores de soldadura disponíveis no mercado

Simulador	Proprietário	VR	AR	Processos de Soldadura Suportados			
				GTAW	GMAW	FCAW	SMAW
WeldVR [13]	Cythero	X		X	X		X
VRTEX 360 [9]	Lincoln Electric	X		X	X	X	X
Soldamatic [34]	Seabery		X	X	X		X
AugmentedArc [24]	Miller		X	X	X	X	X
guideWELD [32]	Realityworks	X			X		X
Simbott VR Welding Simulator [35]	Simbott	X		X	X	X	X
Simbott AR Welding Simulator [36]			X	X	X	X	X
Welducation Simulator [17]	Fronius		X	X	X		X
Portable VR Welding Simulator* [26]	KOMAG	X			X		
VR based real-time interactive training system* [45]	MCST e KOCCA	X			X	X	
Onew360* [44]	Wuhan University of Technology	X			X		
*Simuladores não comercializados, projetos académicos							

2.3 Conclusões

Tal como foi apresentado neste capítulo, a soldadura é uma das atividades essenciais à indústria atual. Existem inúmeras variedades de processos de soldadura, sendo os processos de arco elétrico os mais comuns. Existem quatro tipos diferentes de processo de soldadura de arco elétrico, a soldadura GTAW, a soldadura GMAW, a soldadura FCAW e a soldadura SMAW, cada uma

apresentando vantagens e limitações diferentes. A soldadura é uma atividade de elevado risco e extremamente exigente que continua a ser necessária num elevado número de operações industriais. Apesar de ser imprescindível para o mercado mundial, tem sido registada uma diminuição no número de profissionais qualificados para a realizar. Esta escassez de profissionais qualificados existe devido, não apenas aos diversos problemas de saúde associados a esta atividade, mas também ao custo elevado que a formação nesta atividade apresenta. Uma das soluções tecnológicas encontradas para reduzir os riscos e custos associados à formação de novos profissionais de soldadura foi a utilização de tecnologias VR e AR.

Com o avanço da tecnologia, tem havido um aumento na criação e uso de aplicações que recorrem à utilização de tecnologia VR e AR. Estas tecnologias têm provado ser ferramentas excelentes nos diversos setores em que são incorporadas, como por exemplo, na educação, no ambiente industrial, nas aplicações militares e também na área do entretenimento. Embora já existam simuladores dedicados à formação de novos soldadores, estes constituem soluções altamente específicas e, por vezes, limitadas em termos de acessibilidade e adaptação. Muitos dependem de *hardware* dedicado, o que compromete a portabilidade e a compatibilidade com diferentes *headsets* de VR. Dessa forma, surge a necessidade de desenvolver alternativas mais adaptáveis e compatíveis, capazes de ultrapassar os limites atuais e responder melhor às exigências do setor.

Capítulo 3

Simulador de Soldura em Realidade Virtual

Neste capítulo será apresentado o simulador desenvolvido como projeto de dissertação. O simulador é composto por vários sistemas interligados, em que cada sistema é responsável por diferentes componentes que transformam o simulador numa experiência de formação realista e eficaz. Este capítulo fornece uma análise detalhada da arquitetura do simulador, descrevendo os diferentes sistemas que o constituem e as suas funcionalidades. As duas primeiras secções descrevem a criação do simulador, indicando que tipo de *software* e *hardware* foi utilizado, e o respetivo modo de funcionamento. A última secção deste capítulo tem como objetivo encerrar a exposição e reforçar os principais pontos abordados ao longo da sua estrutura. Cada uma das secções seguintes descreve individualmente os sistemas essenciais ao simulador, abordando temáticas como a documentação da versão inicial do projeto, os mecanismos de monitorização do progresso da soldadura, a captura e registo dos parâmetros de soldadura, bem como as funcionalidades instrutivas implementadas para apoiar o utilizador no processo de aprendizagem. Além disso, são também apresentados os métodos de análise estatística dos dados registados, o sistema de repetição das ações do utilizador, a criação de visualizações gráficas e de relatórios de soldadura, e por fim, a interface gráfica do simulador, com destaque para os aspetos de design e usabilidade. O diagrama da figura 3.1 apresenta a relação entre os diferentes sistemas e a estrutura geral do simulador, ilustrando os diversos componentes e interações entre eles.

3.1 *Software* de Desenvolvimento

Existem neste momento diversas plataformas de desenvolvimento de *software* que ao longo do tempo têm vindo a evoluir de forma a permitir a criação de aplicações do zero. Para a criação e desenvolvimento de um simulador que utiliza tecnologia VR, os motores de jogo são as aplicações que mais se destacam, disponibilizando ao utilizador ferramentas de desenvolvimento de aplicações que são compatíveis com a criação de ambientes. Motores de jogo como o Unity¹, o

¹<https://unity.com/>

Unreal Engine², o Amazon Lumberyard³ e o CryEngine⁴ são compatíveis com tecnologia VR e também oferecem gráficos atraentes capazes de criar os ambientes imersivos desejados para uma aplicação que recorre à tecnologia VR. Cada um destes motores de jogo apresenta vantagens diferentes, principalmente no que toca a preferências do utilizador e especificações do projeto que será criado. Por esse motivo, a escolha do motor de jogo é frequentemente influenciada pela familiaridade e preferência do utilizador, pelo suporte prestado pela plataforma, pela compatibilidade com determinados *headsets* de Realidade Virtual e pelo nível de atividade da comunidade de utilizadores. Como o desenvolvimento do simulador de soldadura já tinha sido iniciado no INESC TEC utilizando o motor de jogos Unity, optou-se por dar continuidade ao uso desta ferramenta. Esta decisão foi reforçada pelas capacidades do Unity no desenvolvimento de ambientes interativos e imersivos, pela sua compatibilidade com diferentes *headsets* de Realidade Virtual e pela vasta comunidade ativa que proporciona suporte contínuo.

O Unity foi utilizado como principal ferramenta de desenvolvimento em conjunto com a linguagem de programação C#, esta linguagem é a principal base para a criação de código no Unity. A linguagem de programação C# é uma linguagem versátil e orientada a objetos, através da qual é possível definir o comportamento de objetos, gerir interações, lidar com eventos e controlar a lógica dentro do jogo ou da simulação a desenvolver, permitindo assim ao programador criar experiências interativas, envolventes e dinâmicas, recorrendo à integração do código criado com ferramentas disponibilizadas pelo Unity, como o motor de física, sistemas de áudio e de *design* de interface do utilizador.

3.2 Integração de Realidade Virtual com Unity

Para a realização de um projeto de simulação de soldadura com recurso à tecnologia de Realidade Virtual, é imprescindível contar com o *hardware* necessário, nomeadamente um computador com capacidades gráficas e de processamento robustas, capaz de suportar o *software* Unity de forma eficiente, bem como um sistema de VR equipado com um *Head Mounted Display* (HMD) e comandos, de forma a proporcionar ao utilizador uma experiência imersiva.

Atualmente, existe no mercado um elevado número de opções de conjuntos VR que podem ser usados para realizar este tipo de trabalho, que variam a nível de desempenho, da adaptabilidade a diferentes necessidades e orçamentos, como, por exemplo, os *Meta Quest 3*, os *HTC Vive Pro 2*, os *Valve Index* e os *Pico Neo 3*. Para este projeto, o INESC TEC disponibilizou, tanto um computador capaz de suportar o *software* Unity eficientemente, como um conjunto *HTC Vive Pro 2*. O conjunto *HTC Vive Pro 2* é composto por um HMD, dois comandos e quatro estações-base, dispostas num quadrado com aproximadamente 16 metros quadrados.

²<https://www.unrealengine.com/>

³<https://aws.amazon.com/lumberyard/>

⁴<https://www.cryengine.com/>

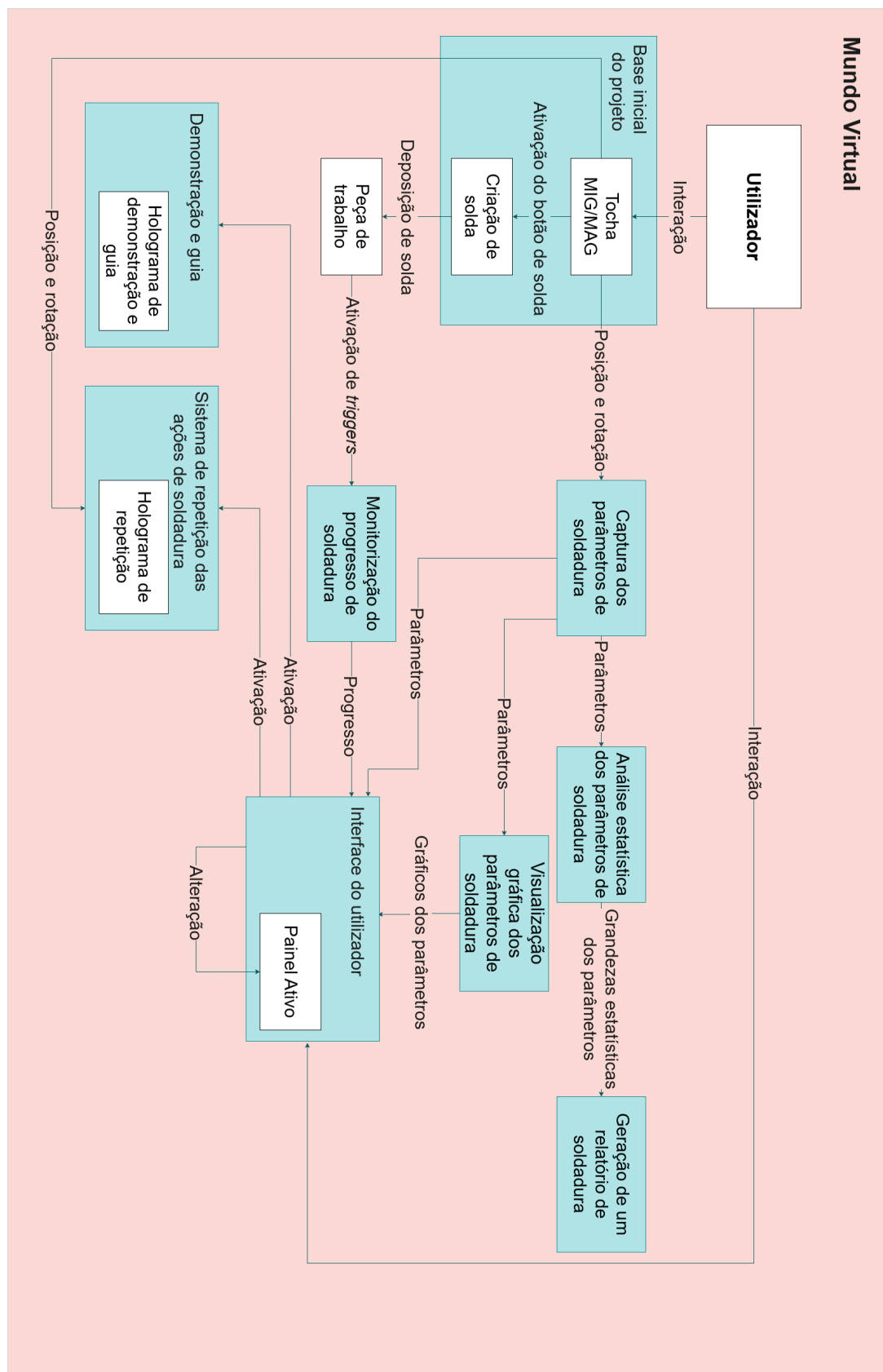


Figura 3.1: Estrutura geral do sistema



Figura 3.2: HTC Vive Pro 2 [10]

O *headset* HTC Vive Pro 2 é preciso e versátil, sendo uma ótima escolha tanto para utilizadores com elevada experiência com sistemas VR como para utilizadores sem experiência. É composto por dois ecrãs LCD RGB de baixa persistência, de forma a diminuir o efeito conhecido como desfoque do movimento (*motion blur*) e proporcionar imagens nítidas e claras mesmo durante movimentos rápidos. Os dois ecrãs apresentam uma resolução combinada de 4896×2448 pixels (2448×2448 pixels por olho), proporcionando visuais 5K que aumentam significativamente a imersão do utilizador. O *headset* é capaz de suportar uma taxa de atualização de 120 Hz, esta taxa é reduzida para 90 Hz quando utilizado sem fios através da incorporação do *Vive Wireless Adapter*, e oferece um amplo campo de visão de 120 graus. Vem incorporado com auscultadores com elevada resolução (*Hi-Res*) contribuindo para elevar a imersão do utilizador. Todo este sistema requer que o computador onde seja utilizado apresente requisitos mínimos de um processador Intel Core i5-4590 ou AMD Ryzen 1500, uma placa gráfica NVIDIA GTX 1060 ou AMD RX 48 e 8GB de RAM. O *headset* é compatível com Windows 10 e 11 [11]. A figura 3.2 ilustra o HTC Vive Pro 2, com quatro comandos e quatro estações-base.

A plataforma de desenvolvimento do *software* para o simulador de soldadura, Unity é uma plataforma amplamente utilizada para o desenvolvimento de experiências interativas em tempo real, que inclui desde jogos 2D e 3D até aplicações de Realidade Virtual e Realidade Aumentada, simuladores e outras experiências imersivas. Diferentes fatores contribuem para a ampla utilização desta plataforma, sendo alguns deles:

- **Compatibilidade entre diferentes plataformas** : o Unity suporta desenvolvimento de *software* que pode ser utilizado num leque variado de dispositivos, desde computadores pessoais a diferentes consolas e dispositivos móveis e, de maior relevância para o simulador de soldadura recorrendo a VR, para diferentes sistemas VR. A compatibilidade entre diferentes plataformas assegura que as aplicações, como o simulador de soldadura, possam ser desenvolvidas e implementadas de forma eficiente numa variedade de dispositivos diferentes.
- **Renderização em tempo real** : o Unity disponibiliza renderização em tempo real, o que significa que o desenvolvedor de *software* pode ver o impacto das alterações que realiza no seu projeto enquanto trabalha. Esta característica do Unity é particularmente crucial no desenvolvimento de aplicações com recurso a VR, onde o aspeto visual e interativo dos elementos necessita de testes imediatos e frequentes de forma a assegurar uma experiência ideal ao utilizador.

- **Motor de física integrado** : o Unity vem equipado com um sistema de física otimizado e robusto que permite simulações realísticas de colisões, forças e interações entre objetos realizadas de forma eficiente. O motor de física integrado é particularmente relevante para o desenvolvimento de aplicações que recorrem a VR, pois assegura que o utilizador interage com o mundo virtual de maneira natural e fiel ao mundo real.
- **Extensa biblioteca de *assets* e suporte da comunidade** : o Unity oferece uma vasta livreria de *assets* e *plug-ins* - extensões que acrescentam funcionalidades específicas ao projeto - através da *Asset Store*, os quais são recursos como, por exemplo, modelos 3D, texturas, materiais e código, que podem ser diretamente utilizados no projeto que está a ser realizado. Para além disso, a comunidade ativa de utilizadores do Unity oferece suporte, discussões, tutoriais e recursos que ajudam o desenvolvedor a transformar a sua ideia em realidade.
- **Suporte para desenvolvimento em ambiente de Realidade Virtual** : o Unity tem ferramentas integradas destinadas a simplificar o desenvolvimento de aplicações VR. Estas ferramentas oferecem suporte a diferentes sistemas VR, como o Oculus, o HTC Vive e o Windows Mixed Reality, disponibilizando configurações pré-definidas para esses dispositivos.

O Unity baseia-se em conceitos fundamentais para o desenvolvimento de projetos, nomeadamente *GameObjects*, cenas e componentes. Os *GameObjects* são blocos de construção fundamentais no Unity, que representam entidades dentro de uma cena, como, por exemplo, uma personagem, um adereço ou uma câmara. Uma cena no Unity agrega todos os *GameObjects* que fazem parte de um segmento específico do projeto. Um projeto pode conter várias cenas, que podem ser carregadas e descarregadas consoante a sua necessidade, permitindo, por exemplo, a transição de cenários para alterar o ambiente em que o utilizador se encontra. Por sua vez, componentes no Unity são módulos responsáveis por definir o comportamento e as propriedades de um *GameObject*, como, por exemplo, a sua *Transform*, que permite alterar a sua posição na cena, o seu *Mesh Renderer* que torna o objeto visível para o utilizador. Estes componentes podem ser nativos ao Unity, como é o caso de *Transforms*, *colliders* e *rigidbodies*. Também podem ser *scripts* de código personalizados criados pelo desenvolvedor ou podem ter origem em *assets* importados da *Asset Store* como é o caso de texturas, materiais e *Mesh Renderers*. Um *GameObject* por si só não tem nenhum tipo de funcionalidade inerente, o seu comportamento provém apenas dos componentes associados ao mesmo. Um *GameObject* com um componente de *Rigid Body* é capaz de ser atuado pelo motor de física do Unity, permitindo interações como gravidade e forças, um *GameObject* com um componente de *Collider* é capaz de interagir fisicamente com outros objetos no ambiente. A criação de *scripts* com código personalizado como componente para objetos, permite a implementação de comportamentos específicos para o projeto, oferecendo uma enorme flexibilidade nas funcionalidades que podem ser realizadas. Esta relação entre *GameObject* e componente é ideal para o desenvolvimento de projetos que utilizem VR, pois oferece ao desenvolvedor a capacidade de criar ambientes altamente imersivos e interativos. De forma a melhor demonstrar como estes

blocos fundamentais do Unity (*Gameobjects*, cenas e componentes) estão integrados num projeto em Unity, criou-se o seguinte diagrama apresentado na figura 3.3.

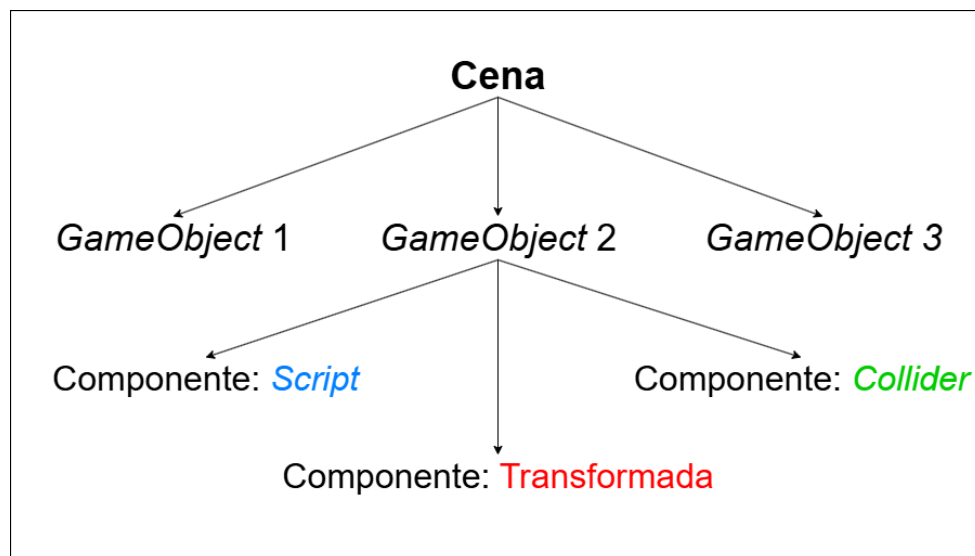


Figura 3.3: Integração de cenas, *GameObjects* e componentes no Unity

De forma a aumentar o que é possível fazer com os blocos fundamentais do Unity (*GameObjects*, cenas e componentes) no desenvolvimento de aplicações imersivas, é essencial recorrer a conjuntos de ferramentas especializadas. Um dos principais conjuntos de ferramentas do Unity essencial ao desenvolvimento de aplicações que utilizam tecnologia VR ou AR é o *Unity's Extended Reality (XR) Interaction Toolkit*. O *XR Interaction Toolkit* oferece uma seleção de ferramentas destinadas a simplificar e acelerar o processo de criação e desenvolvimento de experiências de Realidade Estendida (XR). Este conjunto de ferramentas foi criado com capacidade de se adaptar a diferentes plataformas XR, garantindo compatibilidade do mesmo programa entre diferentes sistemas como o Meta Quest (Oculus), OpenXR e Windows Mixed Reality, entre outros. O *toolkit* inclui funcionalidades básicas e essenciais à interação com o mundo virtual, como a capacidade de pairar sobre objetos, selecioná-los e agarrá-los, melhorando a experiência do usuário no espaço virtual. Para além disso, integra *feedback* háptico por meio de comandos XR, proporcionando sensações táteis realistas que aumentam a imersão do utilizador. Também integra mecanismos de *feedback* visual, como renderização de linhas e criação de diferentes tonalidades, que auxiliam os usuários a distinguir objetos com os quais é possível interagir ou que estão a ser atuados por uma interação do utilizador. Este toolkit também vem equipado com componentes de interação com recurso a interface gráfica com o utilizador (UI) com auxílio dos comandos XR, possibilitando a integração de menus gráficos de forma simples oferecendo ainda mais possibilidades de interação com o mundo virtual. Finalmente, o *toolkit* apresenta vantagens na interação com o *GameObject XR Origin*, que funciona como o ponto de origem do utilizador dos óculos VR, atuando como uma câmara para o mundo virtual que pode ser um ponto fixo no espaço ou permitir experiências com movimento num espaço de escala ambiente [40].

De modo a proporcionar todas as funcionalidades descritas, o *XR Interaction Toolkit* funciona em torno da distinção de dois conceitos fundamentais, o de interações e o de iteradores. As interações envolvem todas as ações que podem ser realizadas com objetos dentro do mundo virtual. Entre elas estão ações como pairar sobre objetos, seleccioná-los e agarrá-los. Também incluem ações de locomoção, que permitem ao utilizador movimentar-se dentro do mundo virtual, e o uso de ferramentas para a interação com a interface gráfica do utilizador dentro do meio virtual. Os iteradores são todos os agentes e mecanismos responsáveis por iniciar e permitir as interações. Estes dois conceitos são fundamentais para a construção de ambientes utilizando o *XR Interaction Toolkit*.

A integração do *XR Interaction Toolkit* num projeto em Unity é realizado pela sua obtenção na loja de *assets* do Unity. Após a adição do *toolkit* ao projeto é necessário importar para o mesmo o *GameObject XR Origin*, que é responsável pelo processo de configuração do *Head Mounted Display* (HMD), como também dos comandos usados. No projeto realizado, o *GameObject XR Origin* encontra-se configurado para o sistema de XR, HTC Vive Pro 2 e os seus respetivos comandos. No entanto, é possível adicionar outros sistemas XR, uma vez que o *XR Interaction Toolkit* é compatível com um grande leque de configurações de *hardware* XR diferentes. Além disso, conta com recursos online disponíveis gratuitamente que oferecem mapeamentos pré-configurados para os dispositivos frequentemente usados. Com o *XR Interaction Toolkit* também é possível realizar ajustes de configurações de mapeamento manuais de forma a alcançar compatibilidade com sistemas de *hardware* especializados ou personalizados. Com as configurações de *hardware* finalizadas é possível integrar os objetos que tornam o ambiente XR interativo e apresentem as características desejadas para um simulador de soldadura em VR. A integração de objetos prontos para ser utilizados numa aplicação em ambiente XR, desenvolvida em Unity, torna-se mais eficiente graças a diferentes ficheiros de código (*scripts*) que estão disponíveis no kit de ferramentas *XR Interaction Toolkit*. Destaca-se, em particular, o *script XR Grab Interactable*. Ao ser adicionado como componente de um *GameObject*, este permite que o objeto apresente diferentes interações que podem ser acionadas pelos iteradores.

3.3 Base Inicial do Projeto

Tal como referido anteriormente, o desenvolvimento inicial do projeto que serve como base para esta dissertação, já tinha sido iniciado no INESC TEC. Este desenvolvimento foi realizado pelo Engenheiro Manuel Bento Barbosa do Couto, como parte do seu trabalho de dissertação pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. Este trabalho encontra-se detalhado na dissertação intitulada "Virtual Reality Applied to Welder Training"[14].

O projeto que se tomou como base para a dissertação apresentava uma cena em Unity com diferentes objetos que fazem parte do que é esperado de um simulador de soldadura, este ambiente encontra-se ilustrado na figura 3.4.

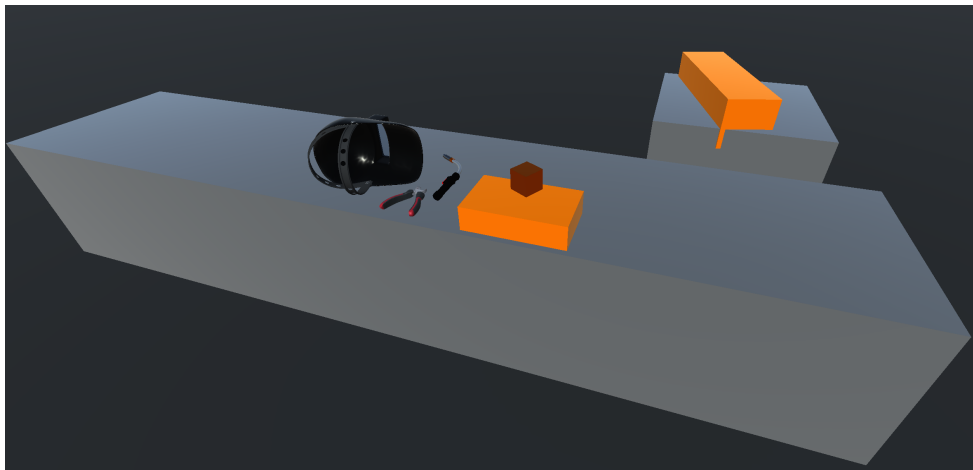


Figura 3.4: Base inicial do projeto

Como é possível observar, o ambiente virtual apresenta duas mesas de trabalho (blocos cinzento claro), cada uma com um bloco cor-de-laranja, onde é possível realizar o processo de soldadura. Para além destes blocos, existe um cubo metálico cor de cobre. Todos estes objetos são *GameObjects* criados em Unity, apresentando componentes similares uns com os outros. Quando se cria um *GameObject* em Unity, é possível selecionar de uma grande variedade de objetos pré-fabricados que são frequentemente utilizados ou é possível criar um objeto vazio que não apresenta nenhum componente associado exceto a sua *Transform*. Os objetos pré-fabricados podem ir desde objetos 3D com diferentes formas, como por exemplo, uma esfera, um cubo, um cilindro, objetos 2D como um retângulo e um círculo, até fontes de luz e áudio e também telas para criação de interfaces do utilizador. Tanto as mesas de trabalho, como os blocos cor-de-laranja e o pequeno bloco cor de cobre são *GameObjects* que apresentam componentes em comum, os mesmos que vêm associados ao bloco pré-fabricado de um cubo 3D do Unity.

- **Transform:** define a posição, rotação e escala do objeto, neste caso um cubo, dentro da cena. Todos os objetos criados, mesmo estes sendo objetos vazios sem nenhum componente, têm obrigatoriamente uma *Transform*. A *Transform* é essencial para colocar objetos no espaço e possibilita também a sua manipulação.
- **Mesh Filter:** contém os dados da malha que definem a forma do objeto, neste caso um cubo. Sem este componente o Unity não saberia qual a geometria do objeto a renderizar.
- **Mesh Renderer:** controla como o objeto aparece visualmente incluindo materiais e iluminação, permitindo ao Unity renderizar o cubo.
- **Box Collider:** define os limites físicos do cubo, permitindo deteção de colisões. Outros objetos podem colidir com este objeto se eles também apresentarem um colisor.
- **Default Material:** material básico que o Unity associa ao cubo de forma a que tenha uma superfície visível. Este material pode ser substituído por um material personalizado de forma a alterar a sua cor, textura e efeitos de iluminação.

Para além destes componentes que estão associados ao bloco pré-fabricado de um cubo 3D do Unity, as mesas de trabalho, os blocos cor-de-laranja e o pequeno bloco cor de cobre apresentam um componente adicional que permite a estes *GameObjects* comportarem-se de acordo com o motor de física do Unity quando são atuados por uma força, como a gravidade, uma colisão e outros tipos de interações, a este componente chama-se *Rigidbody* (corpo rígido em português). Além disso o pequeno bloco cor de cobre também vem equipado com o *script XR Grab Interactable*.

A cena conta também com três *GameObjects* fundamentais no processo de soldadura, são estes: uma tocha de soldadura MIG/MAG, um alicate de corte e uma máscara de soldar. Todos estes objetos vêm também equipados com o *script XR Grab Interactable*.

A tocha MIG/MAG é capaz de simular as operações de uma tocha MIG/MAG real. Quando o utilizador pega na tocha e carrega no botão para a ativar, um fio metálico, que representa o elétrodo, começa a sair da ponta da tocha e se a ponta do elétrodo entrar em contacto com uma superfície capaz de ser soldada, deixa partículas esféricas que pretendem simular a deposição de solda, tal como é possível observar na figura 3.5.

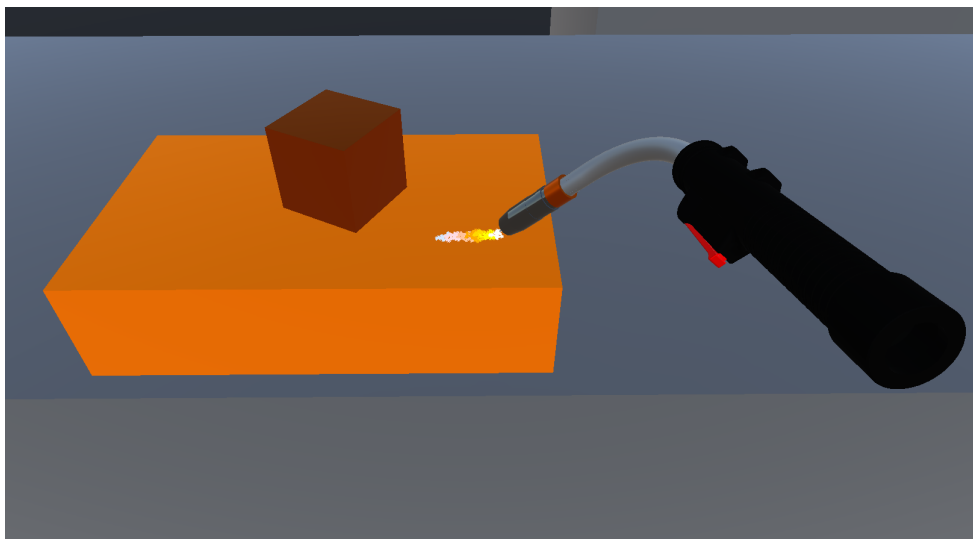


Figura 3.5: Tocha MIG/MAG em funcionamento

As partículas criadas são esféricas e apresentam *Rigidbody* de forma a se comportarem de acordo com o motor de física, *Collider* para que seja detetada a colisão com outros objetos, e *scripts* de comportamento como um líquido. O comportamento das partículas de solda seguem uma simulação de *Smoothed-Particle Hydrodynamics* (SPH).

Quando o utilizador aciona o botão da tocha MIG/MAG começa a sair elétrodo metálico da ponta da tocha, se este elétrodo não entrar em contacto com nenhuma superfície, o elétrodo metálico vai continuar a ser gerado, surgindo assim a necessidade de cortar este elétrodo quando ele excede o tamanho desejado para realizar o processo de soldadura. O alicate de corte é capaz de cortar o elétrodo em excesso quando é ativado e o elétrodo se encontra entre as lâminas. Quando o alicate é ativado é feita uma pequena animação que simula o corte do elétrodo.

A máscara de soldadura foi desenhada para ser colocada pelo utilizador, simulando como seria colocar uma máscara de soldadura real quando aproximada da cabeça. A máscara vem também equipada com um *script* que simula o comportamento de fecho do vidro da máscara sob condições de luz intensa.

Todos estes componentes funcionaram como uma base extremamente sólida para a realização de um simulador de soldadura capaz de responder aos objetivos inicialmente traçados para esta dissertação. A partir deste ponto, todo o desenvolvimento e implementação, testes e análise apresentados neste capítulo foram integralmente realizados pelo autor da mesma, com base nos componentes anteriormente desenvolvidos.

3.4 Monitorização do Progresso da Soldadura

De forma a tornar o simulador de soldadura mais realista e direcionado para a formação de novos soldadores, foi escolhida como peça para soldar, uma junta em T. Esta junta é formada por duas peças de metal que se cruzam num ângulo de 90 graus, tal como é possível verificar pelo esquema representado na figura 3.6.

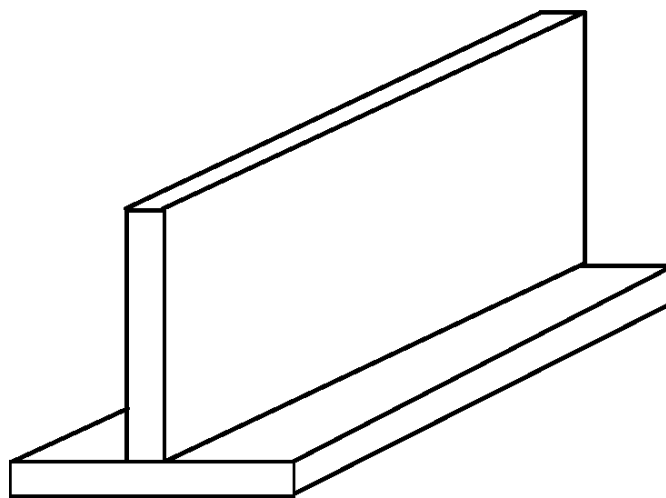


Figura 3.6: Esquema peça tipo T

Escolheu-se este tipo de peça pois é muito comum não só nas indústrias da construção civil, construção naval e automóvel, pois proporciona ligações perpendiculares fortes, mas também é frequentemente utilizada no dia a dia para a montagem de mobília, grades e vedações. Tal como no mundo real, no Unity, colocaram-se dois blocos de metal para criar a peça, obtendo-se, como resultado, a peça apresentada na figura 3.7. A peça apresenta uma largura de aproximadamente 34 centímetros. Esta peça será utilizada como peça de trabalho durante todo o processo de simulação de soldadura.

Um sistema de monitorização do progresso da soldadura é essencial para verificar se a solda foi concluída, sendo assim de especial importância para um simulador de soldadura para formação

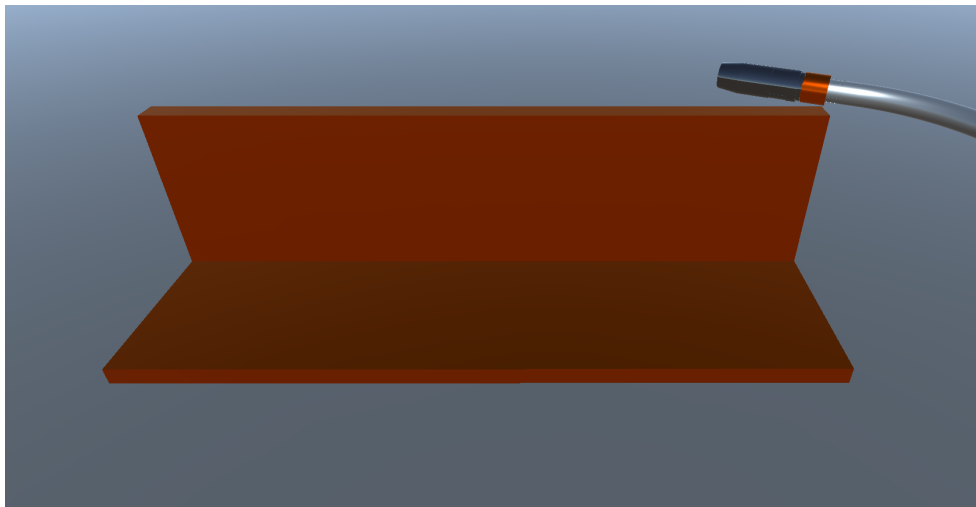
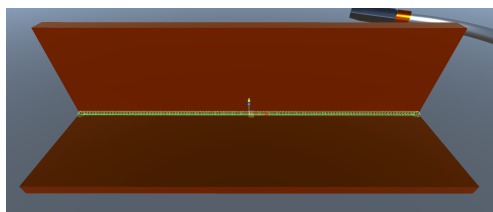
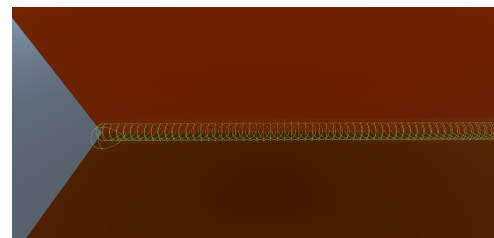


Figura 3.7: Peça tipo T no criada no Unity

de novos soldadores. Para criar este sistema recorreu-se à utilização de *triggers*. Um *trigger* é um tipo especial de *collider* invisível que deteta sobreposição com outros objetos mas não provoca uma interação física. Portanto quando um objeto passa por um *trigger* este é detetado mas o seu movimento não é afetado. Criou-se na zona de contacto entre as duas placas da peça de trabalho uma linha de *triggers* esféricos que devem ser acionados de forma a que se possa concluir que a zona do *trigger* já foi soldada. A figura 3.8 demonstra a linha de *triggers* utilizada e a área de um *trigger*.

(a) Vista geral da linha de *triggers*(b) Vista aproximada da linha de *triggers*(c) Dois *triggers* mais afastados para ilustrar a área de atuaçãoFigura 3.8: Linha de *triggers* e área de um *trigger*

Quando qualquer objeto que apresente um *collider* entra dentro do volume de um *trigger*

este é ativado, como é essencial que os *triggers* apenas ativem quando uma partícula de solda os sobreponha e não quando outro objeto como por exemplo a tocha MIG/MAG o faça, é necessário saber se o objeto que ativou o *trigger* é de facto uma partícula de solda. Para isso utilizou-se uma *tag*, no Unity uma *tag* funciona como um rótulo do *GameObject* que ajuda a identificá-lo. Colocando uma *tag* nas partículas que são depositadas pela tocha MIG/MAG na peça de trabalho é possível verificar se os objetos que entram em contacto com o *trigger* apresentam esta *tag*, no caso de apresentarem, é possível concluir que a zona onde o *trigger* se encontra já foi soldada. A linha de *triggers* utilizada conta com 220 *triggers*.

O progresso é determinado pela percentagem de *triggers* que foram ativados. Se essa percentagem for superior a 90% e a tocha de soldadura não estiver a soldar, considera-se que a solda está concluída. Caso o utilizador seja inexperiente e não consiga alcançar uma taxa de ativação de *triggers* superior a 90%, foram adicionados dois *triggers* de maiores dimensões nas extremidades da peça. Se ambos forem ativados, independentemente dos restantes *triggers*, a solda é também considerada completa. A figura 3.9 apresenta estes dois *triggers* especiais.

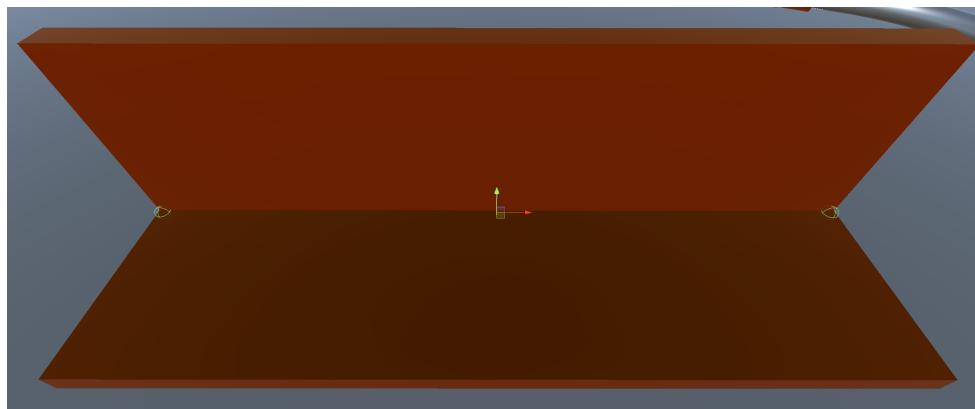


Figura 3.9: *Trigger* inicial e *trigger* final

Também é possível completar a solda utilizando a interface do utilizador apresentada na Secção 3.11. Após a soldadura estar concluída, e também recorrendo à interface do utilizador, é possível observar os *triggers* que não foram ativados, oferecendo assim ao utilizador uma explicação para o valor de percentagem de progresso obtido.

Todas estas funcionalidades foram conseguidas através da criação de *scripts* de código em C# que foram colocados em *GameObjects* no mundo virtual. Os *scripts* associados aos *triggers* foram colocados diretamente em *GameObjects* que partilham do mesmo nome (*Trigger*, *Trigger* (2)) e o *script* que avalia o progresso de soldadura foi colocado num *GameObject* que apenas contém *scripts* que fazem parte da lógica interna do simulador, a que se deu o nome de *GameLogic*. Também foram criados métodos, que são blocos de código que realizam uma tarefa específica, nestes *scripts*. Um destes métodos é utilizado para reiniciar todos os *triggers* e outro para reiniciar a contagem do progresso feito até ao momento, possibilitando assim ao utilizador realizar várias soldas de seguida sem necessitar de reiniciar o programa por completo. Outro método criado permite ao utilizador, após ter completado a soldadura, observar os diferentes *triggers* que não foram

ativados. Este método é feito colocando pequenas esferas vermelhas no local onde os *triggers* que não foram ativados se encontram. Todos estes métodos são ativados, mais uma vez, pela interface do utilizador e serão mencionados novamente na Secção 3.11.

A combinação de *triggers* e *scripts* personalizados permitem monitorizar o progresso do soldador durante o processo de soldadura e verificar a qualidade da solda ao monitorizar a percentagem de *triggers* que foram ativos.

3.5 Captura de Parâmetros de Soldadura

Um dos principais objetivos do simulador de soldadura é ajudar o utilizador a melhorar o seu desempenho no processo de solda, para isso é necessário que alguns parâmetros do processo de soldadura sejam recolhidos e guardados, de forma a serem futuramente analisados pelo utilizador. Existem diferentes parâmetros que podem ser capturados de forma a avaliar a qualidade da solda. Foram capturados, de formas diferentes, parâmetros que são essenciais na avaliação da qualidade do processo de soldadura MIG/MAG que trabalhe numa peça em forma de T, são eles: o ângulo de trabalho, o ângulo de deslocamento, a distância à junta da peça de trabalho, o tamanho do arame metálico, o tempo total do processo de solda e velocidade de solda. Os valores obtidos são atualizados a cada *frame* da simulação.

O ângulo de trabalho é o ângulo que a ponta do eletrodo faz com a junta da peça de trabalho no plano perpendicular à direção do movimento. Para a soldadura de uma peça com uma junta em T este ângulo deve-se manter o mais próximo possível de 45 graus durante todo o processo [28]. Na figura 3.10 é possível observar qual é o ângulo de trabalho numa peça em junta T genérica. Apesar de na simulação virtual este ângulo não ter grande influência em como a solda se deposita, no mundo físico tem elevada relevância pois garante que ocorra penetração e fusão adequada dos materiais soldados, diminuindo o risco de defeitos como o corte inferior (*undercut*) e a fusão incompleta do material.

No projeto em Unity, para calcular o ângulo de trabalho, utilizou-se a componente *Transform* da ponta da tocha MIG/MAG. A *Transform* de um objeto em Unity pode ser acedida para obter o valor do ângulo de rotação em graus em relação a cada um dos três eixos cartesianos no espaço global, através da propriedade da *Transform* denominada *eulerAngles*. Como se colocou a peça a soldar T de forma a que a talha ficasse na mesma direção que o eixo X (eixo vermelho), tal como é possível observar na figura 3.11, apenas é necessário saber a rotação da *Transform* da ponta da tocha MIG/MAG em relação a este eixo, para obter o valor do ângulo de trabalho.

O ângulo de deslocamento é o ângulo que a ponta do eletrodo faz com a superfície da peça de trabalho. Um ângulo de deslocamento entre 5 e 15 graus ou -5 e -15 graus, dependendo se se realiza uma soldadura de empurrar ou de puxar, deve ser mantido durante o processo de soldadura. Na figura 3.10 é possível observar qual é o ângulo de deslocamento numa peça em junta T. No mundo físico, manter o ângulo de deslocamento dentro destes valores, garante que ocorra uma penetração do material adequada e que o cordão de solda não apresente rugosidades indesejadas [42].

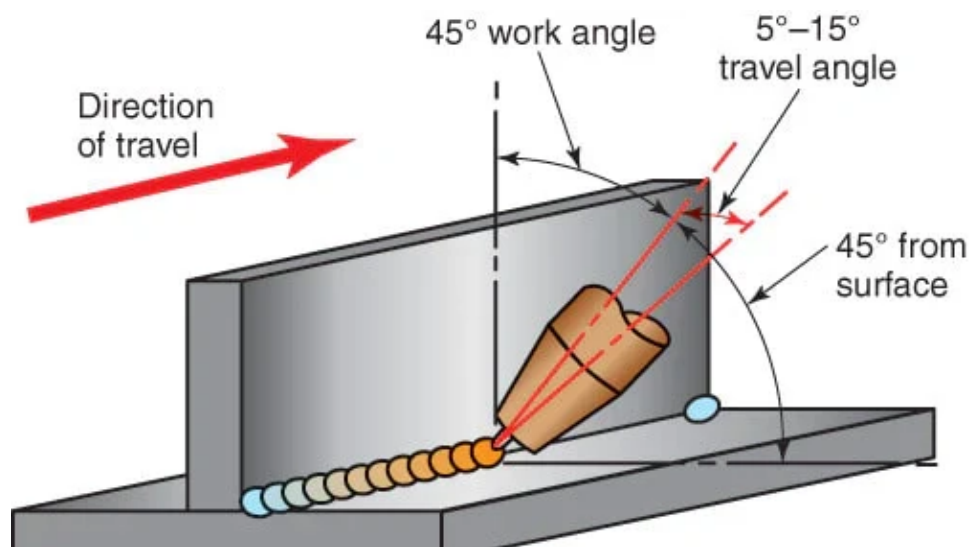


Figura 3.10: Ângulo de trabalho e ângulo de deslocamento numa peça em junta T [46]

Tal como para o cálculo do ângulo de trabalho no Unity, também se recorreu à propriedade da componente *Transform* da ponta da tocha MIG/MAG para obter o ângulo de deslocamento. Como é possível observar pela figura 3.11, o eixo Z (eixo azul) é aquele em relação ao qual a tocha MIG/MAG deve determinar a sua rotação de modo a obter o valor do ângulo de deslocamento. É importante notar que como o sentido positivo do eixo Y (eixo verde) está apontado para cima, é necessário subtrair 180 graus ao valor obtido pois o ângulo quando a tocha MIG/MAG estiver perfeitamente apontada para baixo deve ser 0 graus.

A distância à junta da peça de trabalho é a distância entre a ponta da tocha MIG/MAG e o local onde se pretende soldar. Durante o processo de soldadura a ponta da tocha MIG/MAG deve manter-se a uma distância ideal para o estabelecimento de um arco elétrico e esta distância deve ser mantida constante. Um valor frequentemente adotado em aplicações práticas é próximo dos 1,9 cm, embora este valor possa variar consoante vários fatores, como o tipo de material, a espessura da peça, a posição de soldadura e o diâmetro do arame utilizado. A ponta da tocha MIG/MAG não deve entrar em contacto direto com a peça de trabalho. No mundo físico manter uma distância de trabalho ideal é crucial para a estabilidade do arco elétrico e promove uma transferência de calor consistente. Variações na distância comprometem a qualidade da solda e podem provocar desgaste excessivo no equipamento utilizado para soldar. A distância ideal deve ser a distância mínima necessária para que a tocha não esteja em contacto com a peça de trabalho, variando assim consoante o tipo de peça, as suas dimensões e as dimensões da tocha de soldadura [29].

Para calcular o valor desta distância no projeto Unity criaram-se dois *GameObjects* em cada extremidade da junta da peça para obter as coordenadas destes pontos e criar uma semirreta com os dois pontos criados. Com a semirreta criada é possível obter a menor distância entre a ponta da tocha MIG/MAG e a semirreta criada calculando o produto vetorial entre o vetor direção da semirreta e o vetor que vai desde a ponta da tocha MIG/MAG até à origem da semirreta e de seguida obter a magnitude do vetor obtido pelo produto vetorial. O valor da distância é obtido em

Figura 3.11: *Transform* da peça T

centímetros. Para a peça criada a distância ideal é próxima de 1,5 centímetros e nunca deve ser superior a um valor de 2,2 centímetros.

O tamanho do arame metálico refere-se ao comprimento do arame que sai da ponta da tocha MIG/MAG quando esta é ativada. Este arame é gasto ao longo da simulação se entrar em contacto com uma peça que seja capaz de ser soldada e pode ser cortado pelo utilizador através da utilização do alicate de corte. O tamanho do arame deve aumentar nos momentos iniciais do processo de soldadura e deve-se manter constante quando atinge um certo tamanho ideal para realizar a solda. No mundo físico as características do arco produzido são afetadas pelo tamanho do arame metálico a sair da tocha MIG/MAG e o controlo deste tamanho é essencial para garantir a qualidade do banho de solda formado [29].

No Unity para calcular este parâmetro apenas é necessário calcular a distância entre a ponta da tocha MIG/MAG e a ponta do arame metálico que já são *GameObjects* "filhos" do *GameObject* da tocha MIG/MAG e por isso apresentam *Transforms* associadas.

O tempo total do processo de soldadura refere-se ao tempo que o utilizador demora para completar o processo de soldadura. Tal como foi referido na Secção 3.4 o processo de soldadura é considerado completo se ocorrer uma das seguintes situações, ou a percentagem do número total de *triggers* ativados é superior a 90%, ou os dois *triggers* maiores colocados nas extremidades da peça foram ambos ativados, ou se o utilizador, através da interface gráfica, decidiu que a solda estava completa. No mundo físico a noção do tempo que a solda demorou a ser realizada pode demonstrar a qualidade da solda como também a eficiência do soldador.

Para calcular o tempo em Unity é necessário assegurar que este tempo não é afetado pelo desempenho computacional do sistema onde a simulação se encontra a correr. É então necessário utilizar a interface de tempo *Time* fornecida pelo Unity. Uma das propriedades desta interface chama-se *deltaTime* e devolve o tempo em segundos desde o último *frame* até ao *frame* atual, assegurando desta forma que em sistemas com desempenho diferentes este tempo é calculado de forma consistente. O tempo inicia a sua contagem assim que o utilizador ative a tocha MIG/MAG para soldar e para de contar quando é detetado que a solda já foi concluída. O valor do tempo

inicia a zero e é adicionado o tempo do *frame* ao valor da soma de todos os tempos dos *frames* anteriores, obtendo-se assim o valor total do processo de soldadura.

A velocidade de solda refere-se à velocidade da tocha MIG/MAG ao longo do percurso de solda. No mundo físico, a velocidade do processo de solda determina a entrada de calor na peça e a taxa de arrefecimento da solda, tendo assim um papel crucial em controlar a estrutura e as propriedades mecânicas da solda. Tal como acontece com a distância entre a tocha e a peça de trabalho, a velocidade de soldadura ideal pode variar consoante diversos fatores, como o tipo de material, a espessura da junta, a posição de soldadura e o tipo de gás de proteção utilizado. No entanto, valores típicos frequentemente recomendados situam-se entre 6,4 milímetros por segundo e 8,5 milímetros por segundo [16].

No Unity são calculadas duas velocidades distintas, uma é a velocidade média que é calculada dividindo a distância da junta da peça que precisa de ser soldada pelo tempo que demorou a ser concluída e a velocidade instantânea que é obtida a cada *frame* dividindo a distância entre a posição da tocha MIG/MAG no último *frame* e a posição da tocha MIG/MAG no *frame* atual pelo tempo entre o último *frame* e o *frame* atual. O valor das velocidades é obtido em milímetros por segundo.

Todos estes parâmetros são fundamentais para averiguar a qualidade da solda realizada, tanto em simulação como no mundo real. Os cálculos dos valores são realizados em *scripts* de código em C# independentes que foram todos adicionados como componentes do *GameObject GameLogic* onde se encontra a lógica interna do simulador. Os *scripts* são ativados a cada *frame* obtendo-se um valor novo para todos os parâmetros a cada *frame*. De forma a guardar os parâmetros para uma posterior avaliação da soldadura criou-se um *script* responsável por, a cada *frame*, guardar os valores de cada parâmetro em listas. Uma lista em C# é uma coleção dinâmica de valores do mesmo tipo. Os valores de cada parâmetro são acrescentados à lista correspondente, acabando, no fim do processo de soldadura, por se obter listas dos parâmetros de soldadura todas com o mesmo número de elementos.

3.6 Demonstração e Guia de Soldadura

Um dos subobjetivos definidos no início da realização da dissertação foi o estudo e implementação de experiências virtuais com diferentes graus de dificuldade. De forma a que este subobjetivo fosse cumprido decidiu-se criar um sistema de demonstração e guia de soldadura. A criação de uma demonstração do processo de soldadura oferece ao utilizador uma visualização clara e detalhada de como é o correto procedimento de soldadura, permitindo ao utilizador perceber como deve posicionar a tocha MIG/MAG aquando da realização da simulação. O processo de guia de soldadura permite ao utilizador receber *feedback* e direções imediatas de como deve prosseguir a realização da solda de forma a obter os melhores resultados.

Para a realização destes dois processos decidiu-se criar um holograma da tocha MIG/MAG que efetua a demonstração e a guia de soldadura. A figura 3.12 apresenta o holograma criado em ambiente Unity.



Figura 3.12: Holograma de demonstração e guia

Como é possível observar, o holograma é uma cópia exata da tocha MIG/MAG original em que foi colocado um *shader*. Um *shader* é um componente responsável pelo aspeto visual de um objeto, sendo responsável pela cor, cálculo de luz e sombras e efeitos especiais que o objeto poderá conter [4]. A utilização de um holograma aumenta a experiência imersiva do utilizador no mundo virtual.

O holograma foi criado a partir de uma réplica digital da tocha MIG/MAG original, incluindo todos os seus componentes. Entre eles, destaca-se o componente *Rigidbody*, responsável por tornar o objeto sensível à física do Unity, ou seja, sujeito à gravidade e a colisões com outros elementos da cena. No entanto, como não se pretendia que o holograma fosse afetado por estes fatores, a influência da gravidade foi desativada. Para evitar colisões, optou-se por não remover o *Rigidbody*, uma vez que este desempenha outras funções essenciais. Em vez disso, recorreu-se ao sistema de *layers* do Unity, que permite organizar os *GameObjects* na cena e controlar a sua interação. Assim, o holograma foi atribuído a uma *layer* própria, configurada para interagir apenas consigo mesma e com a *layer* da solda (material simulado), evitando colisões desnecessárias com outros objetos.

Com o holograma já criado é possível definir os diferentes comportamentos que este pode tomar durante a simulação. Definiram-se três modos de funcionamento do holograma, são eles:

- **Demonstração:** neste modo o holograma realiza o processo de solda do início ao fim, depositando solda na junta da peça de trabalho e percorrendo a peça a uma velocidade constante

e com os valores dos parâmetros de soldadura ideais para a sua realização. Este modo é conseguido realizando uma translação da *Transform* do holograma desde o ponto inicial de solda até ao final, sempre com a tocha holograma ativa para soldar de forma a depositar solda durante todo o percurso, como é possível observar pela figura 3.13. A velocidade escolhida para o deslocamento da tocha MIG/MAG foi de $7,4 \text{ mm/s}$ correspondente ao valor médio da faixa ideal de velocidades, compreendida entre $6,4 \text{ mm/s}$ e $8,5 \text{ mm/s}$ apresentados na Secção 3.5. A esta velocidade o holograma demora 47 segundos a completar a demonstração.

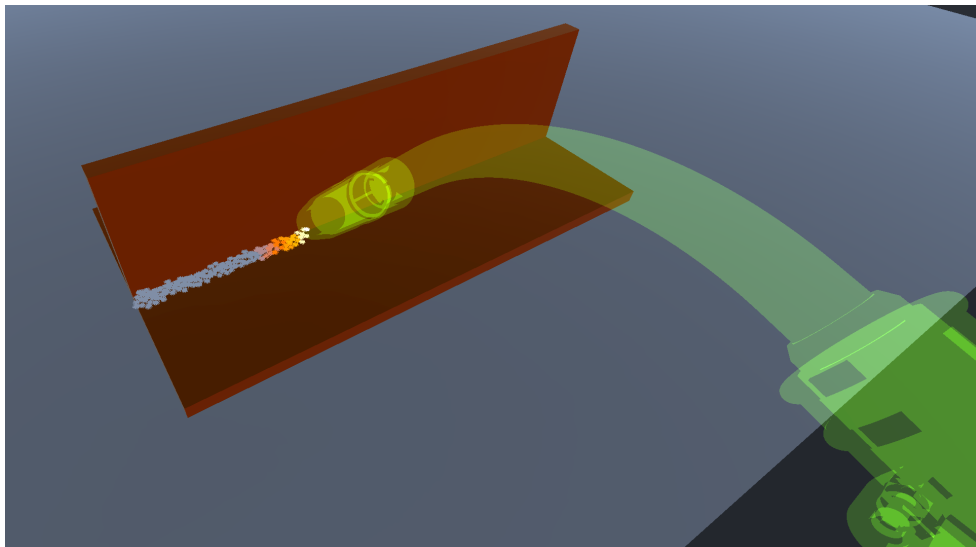


Figura 3.13: Modo de demonstração

- **Guia:** neste modo o holograma comporta-se como um guia para o processo de solda realizando a mesma translação que é feita no modo demonstração, mas com a tocha holograma desativada para soldar. Assim o utilizador é capaz de colocar a tocha MIG/MAG sobreposta no holograma e guiar a tocha de modo a ter uma melhor ideia de como realizar a solda com valores dos parâmetros similares aos seus valores ideais. Este modo permite ao utilizador ganhar confiança nas suas habilidades e melhorar a sua precisão, corrigindo em tempo real a sua técnica de soldadura. É de notar que quando se realiza uma solda com este modo ativo, o holograma de guia apenas inicia o movimento de translação quando a tocha MIG/MAG do utilizador é acionada para soldar. A figura 3.14 apresenta a tocha MIG/MAG do utilizador sobreposta no holograma enquanto este realiza uma solda com o modo guia ativado. Este modo oferece ao utilizador uma visualização clara e detalhada de como realizar o processo de soldadura de forma correta. Tal como no modo de demonstração, o holograma apresenta no modo de guia uma velocidade de $7,4 \text{ mm/s}$, demorando também 47 segundos a completar este modo.
- **Sem Guia:** neste modo o holograma é desativado, desaparecendo por completo da cena e permite ao utilizador verificar as suas competências de solda sem nenhum tipo de auxílio.

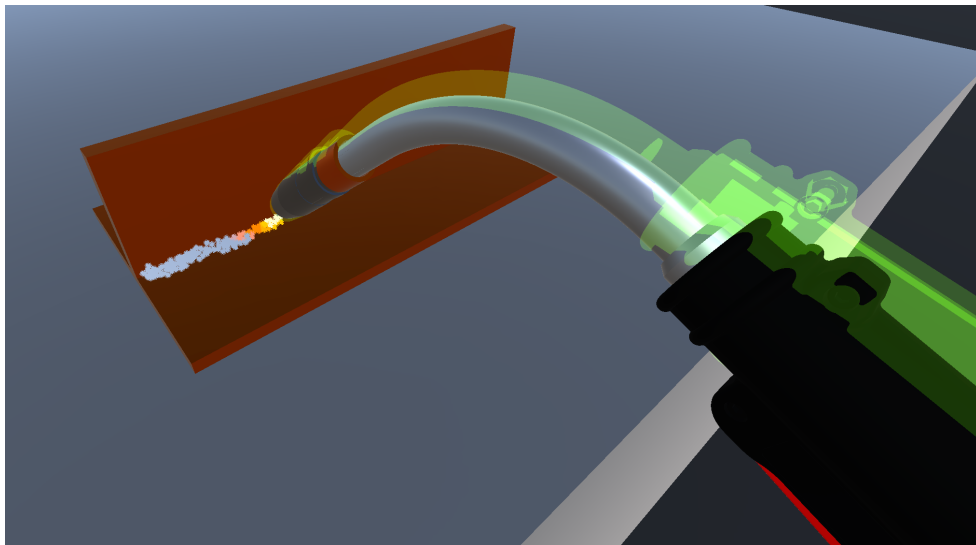


Figura 3.14: Modo com guia

Este modo pode ser utilizado como forma de o utilizador verificar as competências adquiridas com a utilização do simulador. A figura 3.15 apresenta o processo de soldadura sem qualquer guia do holograma.

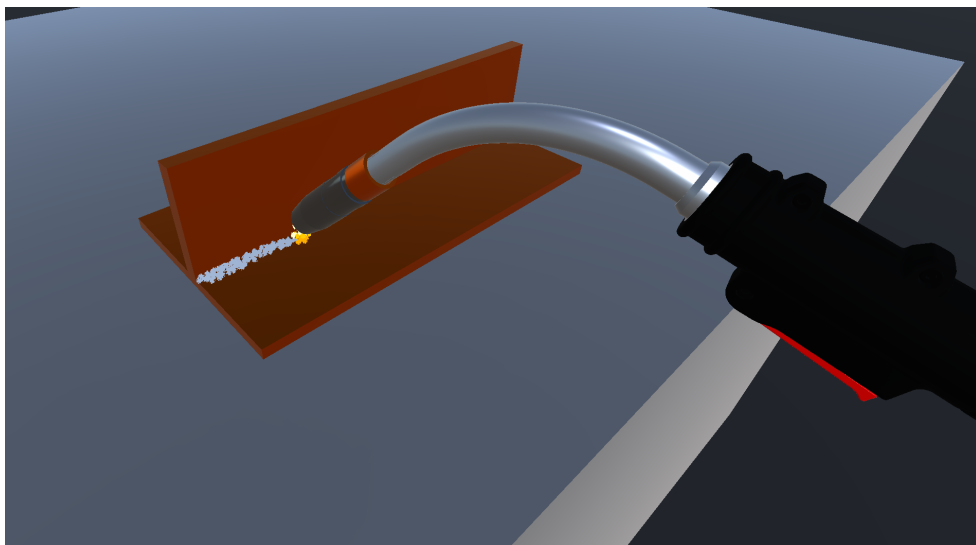


Figura 3.15: Modo sem guia

Os três modos de funcionamento maximizam a eficiência do treino de um novo soldador, tornando o projeto de simulação uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento das capacidades de um novo soldador. A utilização de um holograma visual torna a experiência mais imersiva e mais eficaz na aprendizagem.

3.7 Análise Estatística dos Parâmetros de Soldadura

A análise estatística dos parâmetros de soldadura ajuda a avaliar a performance, consistência e precisão do processo de soldadura realizado pelo utilizador. Os parâmetros aos quais se realizou análise estatística foram os capturados e guardados durante o processo de soldadura e que foram abordados na Secção 3.5, são eles o ângulo de trabalho, o ângulo de deslocamento, a distância à junta da peça de trabalho, o tamanho do arame metálico, o tempo total do processo de soldadura e velocidade de solda. Para todos os parâmetros, exceto para o tempo, foram calculadas as seguintes grandezas estatísticas:

- **Média:**

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.1)$$

Onde x_i são os valores guardados na lista do parâmetro a ser analisado e n é o número total de valores na lista.

A média representa a tendência central que o valor do parâmetro tomou durante a simulação. A média deverá alinhar-se com valores alvo de forma a haver consistência no processo de soldadura garantindo assim a qualidade da solda. Por exemplo, o valor ideal para o parâmetro ângulo de trabalho é 45 graus, por isso a média dos valores da lista deste parâmetro deverá rondar esse valor para a solda ser considerada bem realizada.

- **Variância:**

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n - 1} \quad (3.2)$$

Onde x_i são os valores guardados na lista do parâmetro a ser analisado, n é o número total de valores na lista e μ é a média dos valores.

A variância representa o grau de dispersão estatística dos valores dos parâmetros. Um parâmetro com variância baixa é preferível, pois sugere que o utilizador se mantém consistente nos valores deste parâmetro durante todo o processo de soldadura. Por outro lado, uma variância elevada pode refletir variações significativas na execução, sugerindo inconsistência na aplicação da técnica de soldadura.

- **Desvio Padrão:**

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (3.3)$$

Onde x_i são os valores guardados na lista do parâmetro a ser analisado, n é o número total de valores na lista e μ é a média dos valores.

O desvio padrão mede a dispersão em torno da média, nas mesmas unidades de grandeza que os valores do parâmetro. Tal como na variância, é desejável obter um valor baixo para o desvio padrão pois um valor baixo reflete a consistência da técnica de soldadura do utilizador. O facto de o desvio padrão ser apresentado nas mesmas unidades de grandeza que os valores do parâmetro avaliado permite ao utilizador interpretar e comparar de forma mais intuitiva e direta o valor desta grandeza com os valores dos parâmetros obtidos.

- **Mínimo e Máximo:** Obter os valores mínimo e máximo dos parâmetros de soldadura é importante pois nos fornece o intervalo de valores em que o parâmetro avaliado está compreendido. O mínimo e o máximo devem estar num intervalo de valores aceitável para garantir um processo de soldadura de qualidade. Por exemplo, o tamanho do arame metálico não deve ter um valor máximo muito grande e deve-se utilizar o alicate de corte para se controlar o seu tamanho.
- **Amplitude:**

$$\text{Amplitude} = \text{Maximo} - \text{Minimo} \quad (3.4)$$

A amplitude destaca o intervalo de valores dos parâmetros. Uma menor amplitude de um parâmetro melhor terá sido a estabilidade do mesmo durante todo o processo de soldadura.

- **Mediana:** A mediana é o valor do meio dos parâmetros, quando estes são ordenados do menor para o maior. Este valor deverá ser próximo do valor obtido para a média se a distribuição dos valores for simétrica e deve refletir o valor ideal para o parâmetro que está a ser avaliado. O valor da mediana é menos afetado por valores atípicos que a média, podendo ser em algumas situações, refletir melhor o desempenho do utilizador.

Na análise estatística dos parâmetros de soldadura a consistência dos parâmetros ao longo do processo de soldadura é essencial, logo variância, desvio padrão e amplitude baixas são preferíveis. Combinando valores baixos destas grandezas estatísticas com valores da média e mediana próximos dos valores alvo ideais pode-se aferir que a realização do processo de soldadura foi realizada de forma ideal no mundo virtual. A análise estatística dos parâmetros de soldadura ajuda tanto a entender o grau de aptidão do utilizador, como também as tendências negativas do utilizador durante o processo de soldadura e que deverão ser corrigidas para obter melhores resultados.

3.8 Sistema de Repetição das Ações do Utilizador

Com o objetivo de melhorar a experiência de aprendizagem do utilizador criou-se um sistema de repetição das ações do utilizador. Este sistema é capaz de reproduzir os movimentos da tocha MIG/MAG desde o início do processo de solda até ao fim de forma fluída. Para o sistema de repetição criou-se um holograma da tocha MIG/MAG, diferente apenas na cor do holograma criado e que foi introduzido na Secção 3.6. Este novo holograma está apresentado na figura 3.16.



Figura 3.16: Holograma de repetição

O sistema de repetição foi desenhado para melhorar a aprendizagem do utilizador, pois lhe permite visualizar e analisar o seu desempenho na soldadura através da observação da sua técnica, promovendo autoavaliação e melhoria. Com a utilização do sistema de repetição o utilizador é capaz de visualizar discrepâncias e erros nos parâmetros de soldadura como o ângulo de trabalho, velocidade e os restantes. Este sistema permite também ao instrutor responsável pela formação de novos soldadores, seja capaz de avaliar o formando sem necessitar de observar o processo de solda ao mesmo tempo que este é realizado. Este sistema aumenta significativamente o valor educacional do simulador de soldadura realizado.

A implementação do sistema de repetição das ações do utilizador no Unity passa por capturar e guardar os valores de posição e rotação da tocha MIG/MAG durante todo o processo de soldadura e também guardar os instantes de tempo sempre que os valores de posição e rotação da tocha MIG/MAG são capturados e guardados, desde o início do processo de soldadura até ao fim. Estes valores são guardados em listas, havendo uma lista para as posições, uma para as rotações e outra para os instantes de tempo. Quando a solda estiver concluída o utilizador pode pedir, através da interface gráfica, que seja visualmente demonstrado através de um holograma o processo de soldadura que acabou de realizar. São os valores capturados e guardados durante o processo de soldadura que são utilizados para recrear todo o movimento da tocha MIG/MAG que o utilizador realizou. De forma a garantir que a visualização da repetição acontece de forma suave, utilizou-se interpolação linear para calcular os pontos que a tocha MIG/MAG toma no espaço e no tempo entre os valores guardados durante o processo de soldadura. A interpolação linear é um método

de ajuste de curva que utiliza interpolação polinomial para construir novos pontos entre valores discretos de pontos já conhecidos.

$$P(t) = P_n + (P_{n+1} - P_n) \cdot \frac{(t - t_n)}{(t_{n+1} - t_n)} \quad (3.5)$$

Onde $P(t)$ é a posição interpolada no instante t , e P_{n-1} e P_n são as posições da tocha MIG/MAG guardadas nos instantes n e no instante imediatamente a seguir $n + 1$. O cálculo da posição interpolada $P(t)$ é feito sempre entre dois instantes sucessivos, em que a posição onde se encontra a tocha MIG/MAG e o tempo em que alcançou essa posição são conhecidos e estão guardados em listas próprias. Aplicando a interpolação linear, o sistema de repetição cria uma trajetória suave entre pontos sucessivos da *Transform* do holograma. Esta técnica minimiza transições bruscas e cria um mecanismo de repetição realista que imita de forma fiel os movimentos do processo de solda do utilizador.

A utilização de um sistema de repetição das ações do utilizador com recurso a interpolação linear apresenta diversas vantagens, como a visualização do processo de soldadura e a análise e avaliação qualitativa do processo de soldadura e dos erros cometidos. A figura 3.17 demonstra o uso do sistema de repetição por parte do utilizador após ter realizado o processo de soldadura.

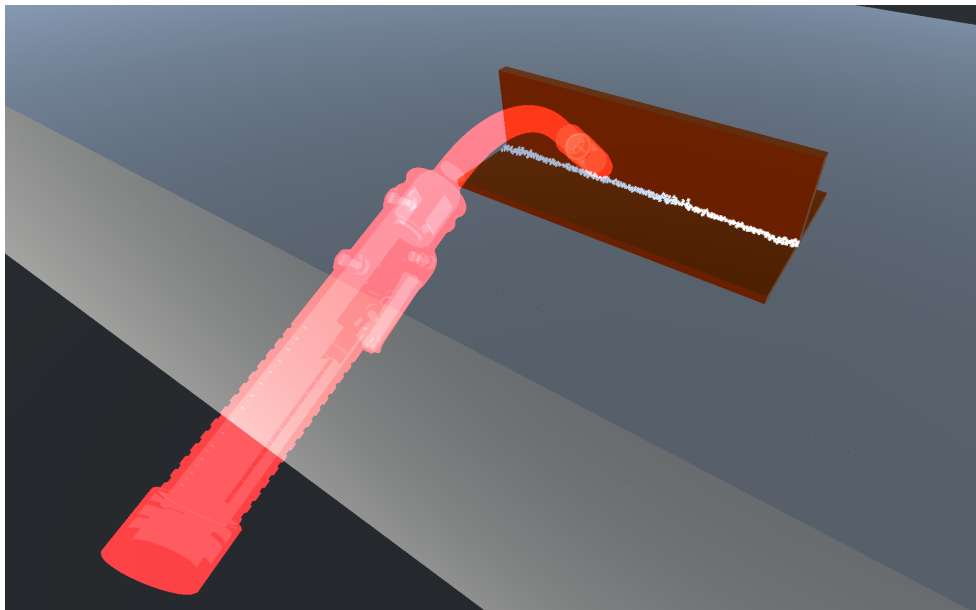


Figura 3.17: Sistema de repetição em funcionamento

3.9 Visualização Gráfica dos Parâmetros de Soldadura

Com a finalidade de melhorar a perceção da performance do utilizador e complementar o *feedback* já recebido pelos sistemas de análise estatística dos parâmetros de soldadura e de repetição das ações do utilizador, criou-se o sistema de visualização gráfica dos parâmetros de soldadura. Este sistema tem um papel crucial na visualização da performance do utilizador, oferecendo uma

maneira intuitiva de analisar a qualidade da solda através da avaliação da variação dos diferentes parâmetros de soldadura ao longo do tempo.

A análise gráfica dos diferentes parâmetros ao longo do tempo oferece ao utilizador uma maneira direta de verificar a sua performance através da visualização da alteração dos valores dos parâmetros ao longo do tempo. Este sistema também permite identificar relações entre os diferentes parâmetros e melhor perceber os erros que foram cometidos de forma a corrigi-los na próxima realização da solda. O uso de gráficos também apresenta vantagens em relação aos outros sistemas de análise dos parâmetros de soldadura, pois tornam a interpretação destes parâmetros mais compreensível e inteligível. A comparação entre duas soldas diferentes fica mais simples recorrendo à análise dos gráficos dos parâmetros de soldadura criados.

No Unity a criação de gráficos foi conseguida através da utilização das listas dos parâmetros de soldadura obtidos anteriormente e explorados na Secção 3.5. O facto de todas as listas de parâmetros de soldadura obtidos terem o mesmo tamanho, e de os valores do parâmetro tempo corresponderem aos instantes em que esses parâmetros foram registados em todas as listas, permite uma criação direta e simplificada a partir desses dados. A criação dos gráficos é realizada após o processo de soldadura estar totalmente concluído.

O Unity não disponibiliza nenhuma ferramenta exclusiva destinada à criação de gráficos, mas contém um componente que, com uma utilização cuidada, é capaz de representar gráficos. Este componente é o *Line Renderer* que permite desenhar linhas e curvas através da conexão de pontos no espaço 3D. O *Line Renderer* trabalha apenas com coordenadas cartesianas no espaço, como os valores dos parâmetros são unidimensionais é necessário passá-los para posições no espaço. Primeiro define-se a escala dos valores que as coordenadas dos pontos a serem utilizados pelo *Line Renderer* podem tomar. Os valores não podem ultrapassar o limite estipulado pelo tamanho da interface do utilizador e devem permitir que sejam adicionados os eixos de coordenadas e valores ao longo destes eixos, existindo, assim, um limite de altura e largura para o gráfico. Com os limites de altura e de largura e com os valores máximo e mínimo de um parâmetro é possível fazer as escalas de cada eixo. O eixo do X é o eixo do tempo e o eixo do Y é o eixo do parâmetro para o qual se está a criar o gráfico. Esta escala de cada eixo é conseguida através das seguintes equações:

$$EscalaX = \frac{LarguraGrafico}{MaxTempo - MinTempo} \quad (3.6)$$

$$EscalaY = \frac{AlturaGrafico}{MaxParametro - MinParametro} \quad (3.7)$$

Com a escala calculada é possível começar a obter valores de posições no espaço através dos valores das listas do tempo e do parâmetro para o qual se está a criar o gráfico. É criado um ponto no espaço de cada vez, ao percorrer iterativamente as listas do tempo e do parâmetro, com o valor de cada coordenada calculado seguindo as seguintes equações:

$$x = (Tempo[i] - MinTempo).EscalaX \quad (3.8)$$

$$y = (Parametro[i] - MinParametro).EscalaY \quad (3.9)$$

$$z = 0 \quad (3.10)$$

Onde $Tempo[i]$ e $Parametro[i]$ são os valores do tempo e do parâmetro no mesmo instante, que corresponde ao valor na posição i destas listas. Os valores obtidos são sempre em relação ao valor mínimo de forma a aproveitar ao máximo o espaço disponível para o gráfico e garantir que todos os valores, desde o mais pequeno ao maior, apareçam todos dentro do espaço delimitado para o gráfico.

Com as equações descritas até ao momento já é possível criar um gráfico que ficará totalmente vertical. Um gráfico totalmente vertical não é ideal pois dificulta a visualização do mesmo. Tal como será indicado na Secção 3.11 a interface do utilizador apresenta uma tela num ângulo de 25 graus em relação ao eixo do X para facilitar a visualização do conteúdo presente na tela. Para que seja possível visualizar o gráfico no mesmo ângulo da tela da interface do utilizador é necessário aplicar transformações trigonométricas às coordenadas anteriormente calculadas pelas equações 3.8, 3.9 e 3.10 de modo a obter o gráfico afetado pela rotação de 25 graus em relação ao eixo do X. Como a rotação é realizada em relação ao eixo do X, os valores desta coordenada não são afetados. As seguintes equações demonstram como são calculados os novos valores afetados pela rotação:

$$xRodado = x \quad (3.11)$$

$$yRodado = y.\cos(25) - z.\sin(25) \quad (3.12)$$

$$zRodado = y.\sin(25) + z.\cos(25) \quad (3.13)$$

Estes valores obtidos apenas precisam de ser somados de um *offset* determinado pela posição da tela na cena de forma a que coincidam com a posição da tela e sejam facilmente observados pelo utilizador. O Algoritmo 1 em pseudocódigo resume todo o processo de criação do gráfico através da utilização de um *Line Renderer*. Os pontos no espaço 3D são colocados por ordem, na escala do tempo, no *LineRenderer* recorrendo à função *SetPosition(index, position)* que necessita como argumentos o índice (*index*) do elemento a colocar, que vai desde o zero até ao número total de elementos da lista do parâmetro para o qual se está a criar o gráfico, e a posição (*position*) no espaço que necessita de estar na estrutura fundamental ao Unity, *Vector3*, que representa uma posição ou direção num espaço de três dimensões usando os três valores de coordenadas x, y e z. O *Vector3* criado para utilização pela função *SetPosition* do *LineRenderer* deverá ser as posições calculadas de x, y e z, para cada elemento da lista do parâmetro, já afetadas pela rotação de 25 graus e somadas com um *offset* de forma a coincidirem com a posição da interface do utilizador.

Algorithm 1 Algoritmo utilizado para a criação da curva do gráfico de um parâmetro

```

1:  $angulo \leftarrow 25$ 
2:  $offset \leftarrow Vector3(offsetX, offsetY, offsetZ)$ 
3:
4:  $EscalaX \leftarrow LarguraGrafico / (MaxTempo - MinTempo)$ 
5:  $EscalaY \leftarrow AlturaGrafico / (MaxParametro - MinParametro)$ 
6:
7: for  $i = 0$  to  $TamanhoListaParametro$  do
8:
9:    $x \leftarrow (Tempo[i] - MinTempo).EscalaX$ 
10:   $y \leftarrow (Parametro[i] - MinParametro).EscalaY$ 
11:   $z \leftarrow 0$ 
12:
13:   $xRodado \leftarrow x$ 
14:   $yRodado \leftarrow y \cdot \cos(angulo) - z \cdot \sin(angulo)$ 
15:   $zRodado \leftarrow y \cdot \sin(angulo) + z \cdot \cos(angulo)$ 
16:
17:   $posicao \leftarrow Vector3(xRodado, yRodado, zRodado) + offset$ 
18:   $lineRenderer.SetPosition(i, posicao)$ 
19:
20: end for

```

O pseudocódigo apresentado é capaz de gerar a curva do gráfico de um determinado parâmetro. Para que o gráfico fique completo, é necessário incluir os eixos correspondentes a cada variável e, para facilitar a interpretação por parte do utilizador, adicionar os valores das variáveis nos respetivos eixos. Para os eixos criaram-se dois *LineRenderers*, um horizontal para o eixo referente ao tempo e outro vertical para o eixo referente ao parâmetro. Para a colocação de valores ao longo do eixo horizontal referente ao tempo colocaram-se cinco valores. Os valores correspondem a valores da lista de tempos, sendo eles, o primeiro valor, seguido dos valores a um quarto, a meio e a três quartos do tamanho total da lista, e por fim, o valor final da lista. Foi utilizado o mesmo método para a colocação dos valores no eixo vertical referente ao parâmetro, sendo previamente necessária a colocação dos valores desta lista em ordem crescente. A distribuição realizada para os valores dos eixos permite uma visualização equilibrada dos dados, facilitando a interpretação do gráfico. Na figura 3.18 é possível observar um dos gráficos criados por este sistema. Para a cor do *LineRenderer* da curva do gráfico foi utilizada a cor vermelha pois oferece alto contraste com o ambiente envolvente, tornando os dados mais visíveis e fáceis de interpretar.

3.10 Geração de um Relatório de Avaliação de Soldadura

Tal como já foi referido anteriormente, na aprendizagem de uma nova competência, como soldar, o *feedback* baseado em dados desempenha um papel crucial. No simulador, o sistema de geração de um relatório de avaliação de soldadura é um componente crucial pois permite aos utilizadores guardar, analisar e comparar diferentes simulações de soldadura executadas. A criação

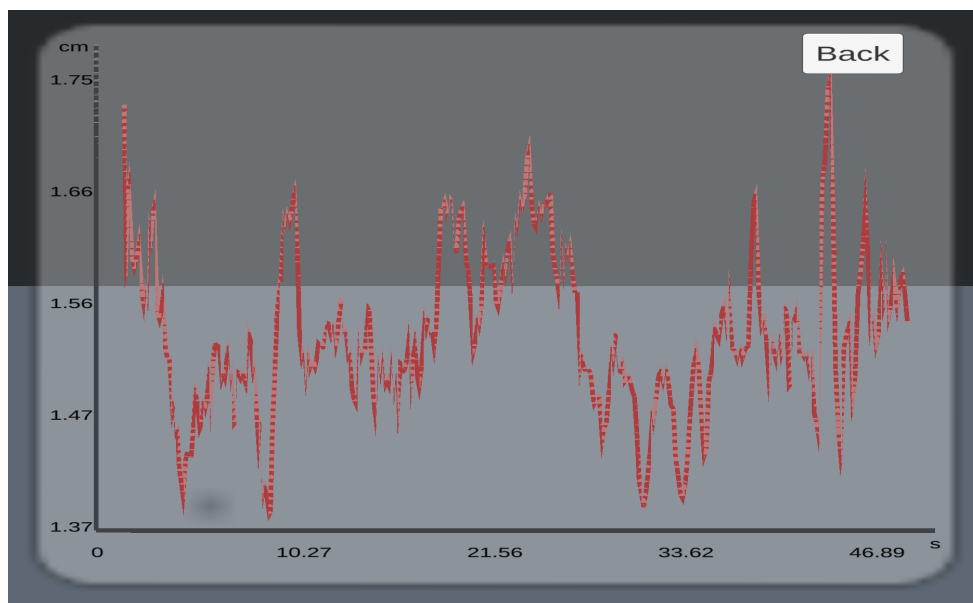


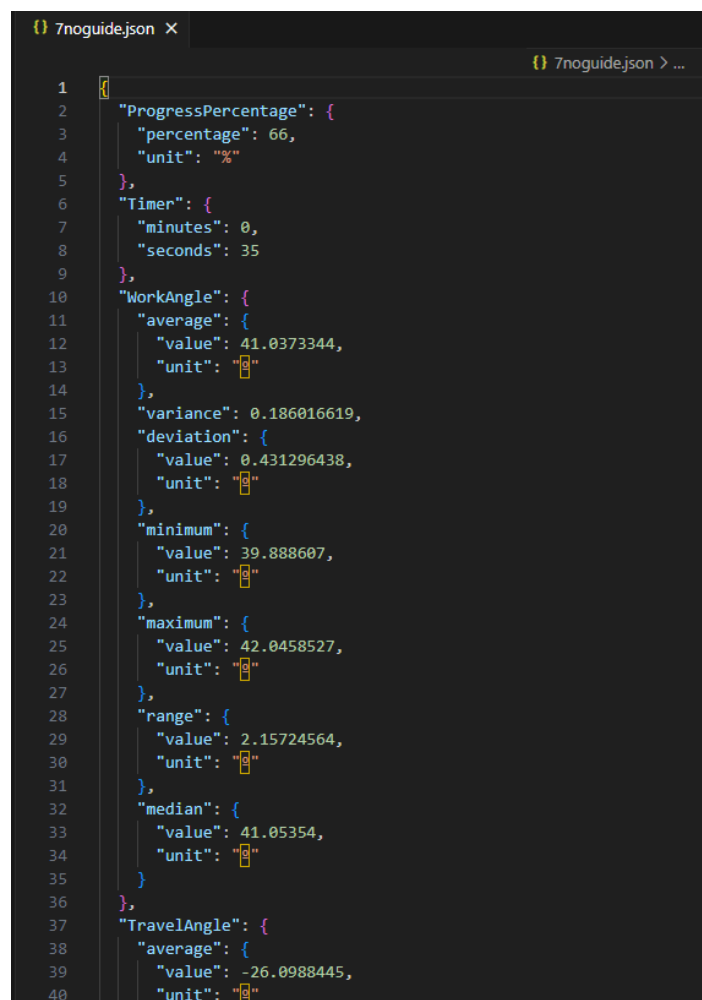
Figura 3.18: Gráfico do parâmetro distância à peça

e posterior armazenamento de um relatório, que possa ser acedido externamente à aplicação, permite ao utilizador comparar o seu desempenho em diversas simulações e facilita a monitorização do seu progresso enquanto soldador, ajudando também o instrutor a avaliar o avanço do estudante ao longo do tempo.

A geração de um relatório de avaliação de soldadura no Unity trata-se da criação e do armazenamento de um ficheiro fora da aplicação que deve ser estruturado de forma a que seja facilmente lido pelo utilizador. O conteúdo deste relatório inclui todas as grandezas estatísticas obtidas para cada parâmetro de soldadura, apresentados na Secção 3.5, e calculados tal como foi explicado na Secção 3.7. O relatório também contém o tempo total que o processo de soldadura demorou e a percentagem do número total de *triggers* que foi ativado durante o processo de soldadura, abordado na Secção 3.4. Para o formato do ficheiro utilizou-se o formato JSON. Foi escolhido o formato JSON porque é um formato estruturado e facilmente legível por um humano, não sendo necessária a utilização de software específico para ser lido e organiza de forma hierárquica os dados recorrendo ao formato par nome-valor, outros formatos como o texto simples ou o CSV não permitem esta estrutura hierárquica. Quando comparado com outros tipos de formatos, como por exemplo o XML, o formato JSON apresenta um tamanho menor devido à sua sintaxe, tornando-o mais rápido de analisar e processar, o que torna o sistema de geração do relatório mais eficaz e leve. Os ficheiros de tipo JSON são compatíveis e suportados pelo Unity através do uso de bibliotecas e muitas linguagens de programação e de base de dados suportam o uso de ficheiros JSON sem a necessidade de efetuar qualquer tipo de processamento adicional, como é o caso das linguagens Python, Java e sistemas NoSQL. O formato JSON permite também o aninhamento de dados, o que é ideal para guardar os parâmetros de soldadura e os valores estatísticos obtidos para cada um. Ficheiros do tipo JSON também são facilmente transferidos entre sistemas e muitas aplicações com base na nuvem e web APIs usam o formato JSON frequentemente, tornando assim este formato

uma escolha versátil e que permitirá futuras expansões e integrações com outras plataformas.

Para além do enorme valor educacional que este sistema proporciona ao oferecer *feedback* personalizado ao utilizador, também apresenta diversas implicações práticas. A possibilidade de criação de uma base de dados com os dados recolhidos durante os processos de soldadura, os quais podem ser úteis para pesquisas académicas e aplicações industriais. Pode ser usado para criar padrões de treino definindo metas mensuráveis para o formando atingir. Este sistema poderá futuramente também ser a base da criação de um sistema de avaliação automática do desempenho do utilizador, reduzindo a dependência da análise manual. A figura 3.19 apresenta a parte inicial do conteúdo do relatório criado em formato JSON.



```
1 {
2   "ProgressPercentage": {
3     "percentage": 66,
4     "unit": "%"
5   },
6   "Timer": {
7     "minutes": 0,
8     "seconds": 35
9   },
10  "WorkAngle": {
11    "average": {
12      "value": 41.0373344,
13      "unit": "°"
14    },
15    "variance": 0.186016619,
16    "deviation": {
17      "value": 0.431296438,
18      "unit": "°"
19    },
20    "minimum": {
21      "value": 39.888607,
22      "unit": "°"
23    },
24    "maximum": {
25      "value": 42.0458527,
26      "unit": "°"
27    },
28    "range": {
29      "value": 2.15724564,
30      "unit": "°"
31    },
32    "median": {
33      "value": 41.05354,
34      "unit": "°"
35    }
36  },
37  "TravelAngle": {
38    "average": {
39      "value": -26.0988445,
40      "unit": "°"
41    }
42  }
43 }
```

Figura 3.19: Excerto do ficheiro JSON contendo o relatório de avaliação de soldadura

3.11 Interface do Utilizador

A interface do utilizador (UI) é o ponto de interação entre o ser humano e o computador. No simulador de soldadura a interface do utilizador existente é uma tela, colocada atrás da peça de soldadura, de forma a que seja facilmente visível durante o processo de soldadura. A figura 3.20

apresenta o posicionamento da tela utilizada para a interface do utilizador. Tal como é possível verificar esta tela apresenta-se num ângulo de 25 graus, tal como já foi referido anteriormente, de modo a que seja mais facilmente visível pelo utilizador. Ao longo do desenvolvimento do projeto foram criados painéis com diferentes componentes visuais e interativos, como texto e botões, com o conteúdo necessário para que o uso e navegação do simulador seja simples e intuitivo. A interface do utilizador tem um papel fundamental no simulador, pois permite visualizar os vários conteúdos definidos e calculados pelos diferentes sistemas anteriormente abordados, como os parâmetros capturados, as grandezas estatísticas dos parâmetros e os gráficos temporais de cada parâmetro. Além disso, possibilita ao utilizador ativar e definir o comportamento de outros sistemas, como o sistema de demonstração e guia de soldadura e o sistema de repetição de ações do utilizador, é através da interface que o utilizador seleciona se deseja realizar a solda com guia ou sem guia, visualizar a demonstração do processo de soldadura ou até mesmo rever a repetição das suas ações.

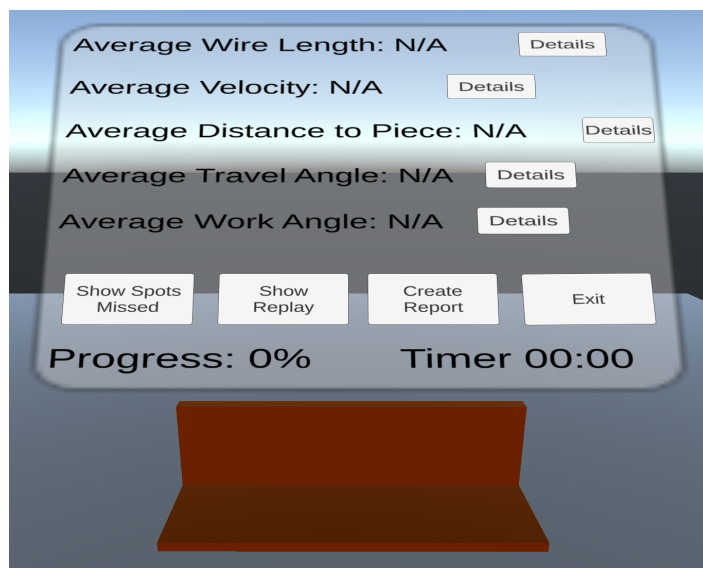


Figura 3.20: Posicionamento da tela da interface do utilizador

Tal como já foi referido, foram criados diversos painéis, cada painel é apresentado individualmente ao utilizador e contém elementos de texto e botões interativos. Os elementos de texto têm como propósito apresentar informação e guiar o utilizador na navegação do simulador. Os botões interativos têm como função permitir ao utilizador fazer escolhas e navegar o simulador. As transições entre painéis da interface do utilizador e algumas definições do comportamento do simulador são selecionadas através da invocação de métodos associados à ativação de botões. Um método trata-se de um bloco de código que contém uma série de instruções destinadas à realização de uma tarefa específica. No simulador desenvolvido, os métodos são o suporte principal de todas as interações realizadas entre o utilizador e o simulador através dos botões presentes na interface do utilizador. Alguns exemplos de métodos acionados por botões incluem aqueles que regulam a experiência do utilizador e o funcionamento do simulador, tais como a alteração do painel visível

na interface, ativando um painel específico e desativando todos os outros, garantindo que apenas o painel desejado fique visível, a iniciação da demonstração de soldadura apresentada na Secção 3.6 e a escolha entre a realização do processo de soldadura com guia ou sem guia. Estruturando a interface do utilizador e o simulador em torno da invocação de métodos, a aplicação mantém-se organizada e eficiente.

O primeiro painel exibido ao utilizador é o painel apresentado na figura 3.21 (Painel 1). Como é possível observar, este painel tem como funcionalidade perguntar ao utilizador se deseja visualizar a demonstração do processo de soldadura que irá realizar. O utilizador, conforme a sua necessidade de observar a demonstração, pode escolher carregar no botão *Yes*, que o levará a assistir à demonstração, ou no botão *No*, que lhe permitirá passar à frente este passo. A demonstração realizada é a que foi abordada na Secção 3.6. Consoante a escolha do utilizador, o próximo painel que é exibido é diferente.



Figura 3.21: Painel 1: Escolha da demonstração

Caso o utilizador tenha escolhido observar a demonstração, o painel que vai passar a ser exibido é o painel apresentado na figura 3.22 (Painel 2). Este painel apresenta os valores dos parâmetros de soldadura do holograma da tocha MIG/MAG durante todo o processo de demonstração, estes correspondem aos valores ideais. Os valores de distância à peça, de ângulo de deslocamento e de ângulo de trabalho encontram-se a verde de forma a reforçar que estes são os valores que o utilizador deverá usar como referência para a sua sessão de soldadura. Para além dos parâmetros de soldadura também é exibido o progresso da solda e o tempo decorrido desde o início da demonstração, estes dois valores também servem como referência, pois ajudam o utilizador a perceber a taxa de progresso e o tempo que deve demorar a chegar a um certo ponto da peça. Neste painel também existe um botão de saída da demonstração, que ao ser carregado irá terminar a demonstração, independentemente do progresso feito até ao momento e o painel a ser exibido será outra vez o Painel 1 (Figura 3.21).

Caso o utilizador tenha escolhido não ver a demonstração, o painel que vai passar a ser exibido passa a ser o painel apresentado na figura 3.23 (Painel 3). Como é possível observar, este



Figura 3.22: Painel 2: Demonstração

painel tem como funcionalidade perguntar ao utilizador se pretende, ou não, utilizar guia durante o processo de soldadura. O sistema de guia é o apresentado na Secção 3.6.



Figura 3.23: Painel 3: Escolha de guia de soldadura

Após o utilizador escolher se quer realizar o processo de soldadura com ou sem guia, está pronto a soldar. Independentemente da escolha que fez no painel anterior, o painel que será ativado corresponde à figura 3.24 (Painel 4). Este painel é semelhante ao painel ao apresentado durante a demonstração, exibindo, em tempo real os valores dos diversos parâmetros de soldadura registados. Como é possível observar os valores de distância à peça, ângulo de deslocamento e ângulo de trabalho podem apresentar três cores distintas, verde, amarelo e vermelho que têm como finalidade indicar se o valor registado se encontra próximo do valor ideal. Se a cor for verde significa que o utilizador está próximo do valor ideal e deve continuar a manter o valor deste parâmetro, se a cor for amarelo significa que é necessário um pequeno ajuste para que o valor se aproxime do valor ideal e se for vermelho o utilizador deve fazer uma alteração significativa na técnica de

soldadura de forma a que este parâmetro atinja um valor correto. Para além dos parâmetros, no painel também é apresentado o tempo decorrido desde o início da solda e a taxa de progresso. A taxa de progresso, tal como já foi indicado na Secção 3.4 é a percentagem de *triggers* ativados durante o processo de soldadura, caso este valor se encontre longe de 100% quando o utilizador se aproxima do fim do percurso de solda, isto pode indicar que a soldadura não está a ser realizada na localização correta, sendo necessário ajustes à técnica do utilizador. Também é possível observar que este painel apresenta um botão, que quando carregado informa ao utilizador que o processo de solda foi completo. Quando o processo de soldadura é considerado completo este painel deixa de ser exibido e passa a ser exibido o painel mostrado na figura 3.25 (Painel 5). A solda é considerado concluída quando uma das seguintes três condições é satisfeita, ou a percentagem de *triggers* ativados é superior a 90%, ou os *triggers* de maiores dimensões nas extremidades da peça foram ambos ativados (ver Secção 3.4), ou o botão apresentado na tela for ativado.

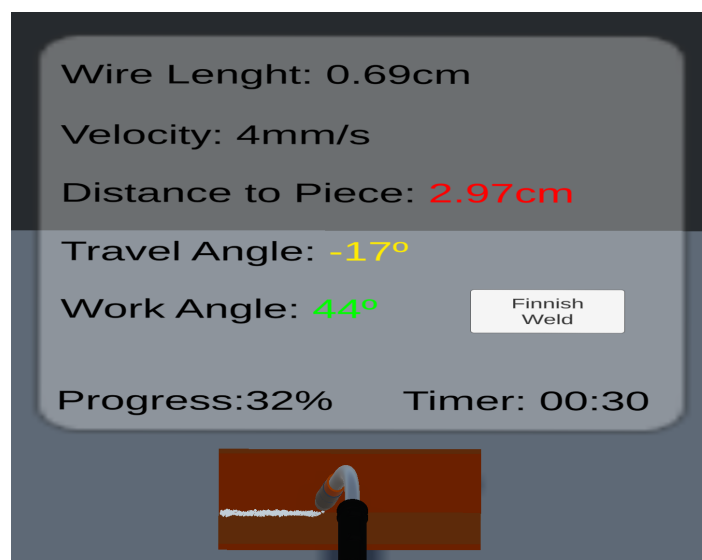


Figura 3.24: Painel 4: Processo de soldadura em execução

O Painel 5 (Figura 3.25) é exibido quando o processo de soldadura ficar concluído. Este painel exhibe as médias dos parâmetros de soldadura capturados, a percentagem de progresso, o tempo que o utilizador demorou a completar a soldadura. O esquema de cores referido anteriormente também se aplica às médias da distância à peça, ângulo de deslocamento e ângulo de trabalho. À frente da média de cada parâmetro existe um botão de detalhes (*Details*), este botão encaminha o utilizador para um painel semelhante ao apresentado na figura 3.27 (Painel 6). Para além desses botões, existem quatro botões de dimensão maior que realizam tarefas diferentes.

O primeiro, *Show Spots Missed*, marca com esferas vermelhas todas as posições dos *triggers* que não foram ativados durante o processo de soldadura, justificando a percentagem de progresso conseguida. A figura 3.26 apresenta como fica a peça após este botão ser carregado. O segundo botão, *Show Replay*, quando carregado ativa o sistema de repetição de ações do utilizador apresentado na Secção 3.8. Quando este botão é carregado o holograma vermelho da tocha MIG/MAG surge e exhibe todos os movimentos realizados pelo utilizador. O terceiro botão, *Create Report*,

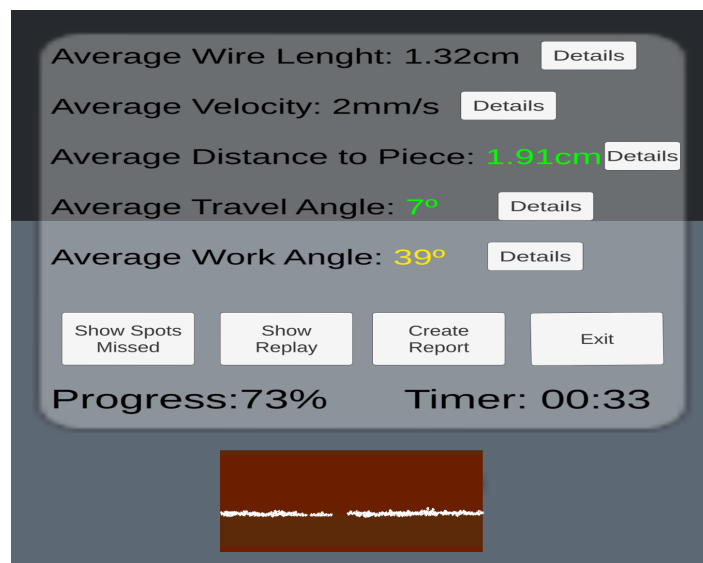


Figura 3.25: Painei 5: Solda completa

ativa o sistema descrito na Secção 3.10, gerando um relatório de avaliação de soldadura. Finalmente, o último botão, *Exit*, elimina todos os valores dos parâmetros de soldadura guardados, remove toda a solda existente na peça e retorna o utilizador ao ponto inicial do simulador, voltando novamente a apresentar o primeiro painel, possibilitando ao utilizador a realizar outra sessão de solda ou até mesmo visualizar a demonstração.

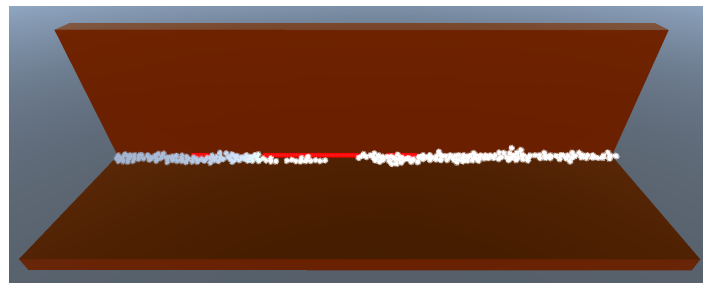


Figura 3.26: Locais com solda em falta

Caso o utilizador tenha carregado num dos cinco pequenos botões de detalhes (*Details*) passará a ser apresentado um painel similar ao Painel 6 (Figura 3.27). Este painel é responsável por apresentar todas as grandezas estatísticas calculadas pelo sistema descrito na Secção 3.7 do parâmetro que foi selecionado. No caso da figura 3.27, foi pressionado o botão de detalhes de ângulo de trabalho, sendo então apresentados ao utilizador os valores de média, variância, desvio padrão, máximo, mínimo, amplitude e mediana deste parâmetro. Existem dois botões que o utilizador poderá pressionar, o primeiro, *Show Graph*, irá apresentar ao utilizador o gráfico do parâmetro selecionado anteriormente, neste caso o gráfico exibido será do ângulo de trabalho. O segundo botão, *Go Back*, retornará o utilizador para o painel anterior, o da figura 3.25.

A apresentação do gráfico criado pelo sistema descrito na Secção 3.9 é feita através da interface do utilizador e é visualizado a partir de um painel similar ao apresentado na figura 3.28 (Painel 7).

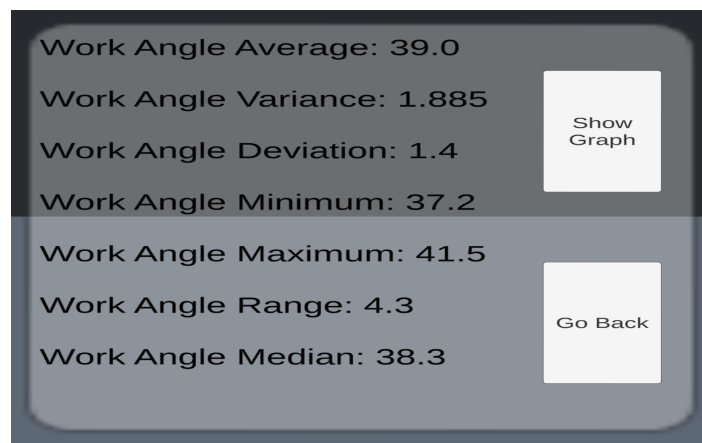


Figura 3.27: Painel 6: Detalhes de parâmetro de soldadura

Este painel, para além de apresentar o gráfico de evolução do parâmetro ao longo do tempo, inclui eixos de coordenadas com os valores assumidos por esse parâmetro. A visualização gráfica dos parâmetros de soldadura é mais intuitiva e fácil de ser interpretada pelo utilizador. Na figura 3.28 é apresentado o gráfico da evolução temporal do parâmetro ângulo de trabalho. O painel apresenta um botão, *Back*, que ao ser pressionado retornará o utilizador ao painel anterior, o Painel 6 (Figura 3.27).

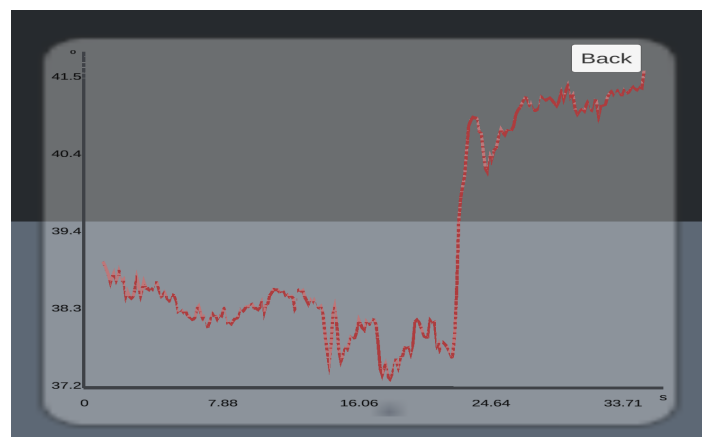


Figura 3.28: Painel 7: Gráfico de parâmetro de soldadura

A interface do utilizador é responsável por criar um ponto de comunicação entre o utilizador e o simulador, que deve ser navegado de forma simples e intuitiva. A interface é essencial na ativação, definição do comportamento e transmissão das informações dos diferentes sistemas do simulador. A evolução dos painéis apresentados na tela da interface do utilizador pode ser resumida pelo diagrama apresentado na figura 3.29.

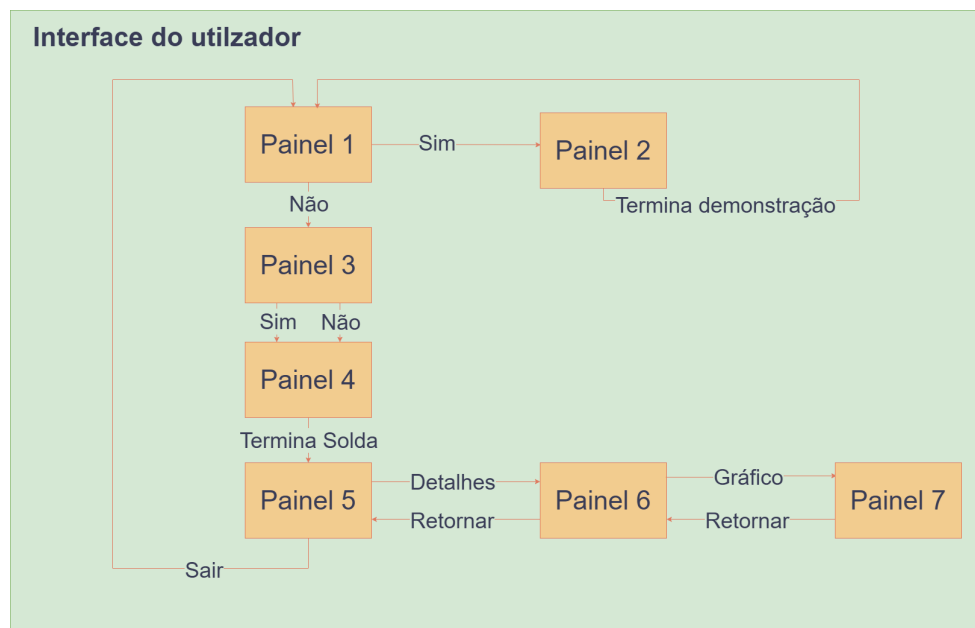


Figura 3.29: Diagrama de evolução da interface do utilizador

3.12 Conclusões

Ao longo deste capítulo foi explorada a arquitetura do simulador e foram apresentados os diferentes sistemas que o constituem, bem como o seu papel na criação de uma experiência de formação em soldadura realista e eficaz. Cada sistema apresenta uma funcionalidade singular, que, em conjunto com os outros sistemas, forma um simulador completo para uma formação eficaz que visa aprimorar a técnica do utilizador.

Através do uso da plataforma Unity, em conjunto com a linguagem de programação C#, o simulador proporciona um ambiente altamente interativo, enquanto a integração com Realidade Virtual garante uma experiência imersiva ao simulador. A monitorização em tempo real e análise dos parâmetros de soldadura oferecem ao utilizador *feedback* essencial, e funcionalidades como a repetição das ações e a visualização gráfica dos parâmetros de soldadura facilitam a avaliação do desempenho e a melhoria ao longo do tempo das capacidades técnicas do utilizador.

Capítulo 4

Testes, Resultados e Discussão

Neste capítulo é apresentado o processo de validação do simulador de soldadura desenvolvido, bem como os resultados obtidos nos testes de validação e a análise crítica dos mesmos. A validação foi realizada através da aplicação de testes práticos com voluntários, permitindo recolher dados quantitativos, relativos ao desempenho técnico dos participantes, e dados qualitativos, associados à percepção da usabilidade e carga de trabalho do utilizador.

Os resultados são apresentados de forma estruturada em tabelas e gráficos, começando pela caracterização dos participantes e pela análise dos parâmetros de soldadura extraídos do simulador. Seguem-se os dados obtidos através da análise das respostas ao questionário específico do estudo e os questionários padrão NASA TLX e SUS. A análise final dos resultados permite avaliar a eficácia do simulador, identificando pontos fortes e limitações.

4.1 Testes

A validação do simulador de soldadura criado é essencial, pois permite a avaliação da sua eficácia, da experiência do utilizador e do impacto de todos os diferentes sistemas que o constituem e que foram abordados no capítulo anterior. Esta validação foi feita através da realização de testes ao simulador criado. Os testes foram realizados através da colaboração de voluntários que testaram o simulador de soldadura em condições reais de uso.

De forma a que os resultados dos testes reflitam a sua eficácia e aplicabilidade em condições reais de uso, foi criada uma metodologia rigorosa para os testes de validação do simulador. Foram considerados tanto valores quantitativos e qualitativos para avaliar a eficácia do simulador. Os valores quantitativos referem-se a dados numéricos e mensuráveis que se obtêm diretamente do simulador através do sistema de geração de um relatório de avaliação de solda, apresentado na Secção 3.10 do capítulo anterior, que guarda os valores de todas as grandezas estatísticas dos parâmetros guardados durante o processo de soldadura. Os valores qualitativos dizem respeito à percepção dos utilizadores, à sua experiência e opinião do simulador de soldadura, estes valores são obtidos através do preenchimento de formulários. Para a avaliação qualitativa do simulador foram utilizados formulários standard amplamente reconhecidos, são eles o, NASA Task Load Index

(NASA TLX) e o System Usability Scale (SUS) como também um formulário mais direcionado ao simulador de soldadura desenvolvido [20, 3].

O NASA Task Load Index (NASA TLX) é um método de medição da percepção da carga de trabalho de uma tarefa pela pessoa que o realiza. Numa primeira parte deste método são avaliadas, numa escala de 0 a 20, as seguintes seis dimensões de carga de trabalho: demanda mental (*mental demand*), demanda física (*physical demand*), demanda temporal (*temporal demand*), desempenho (*performance*), esforço (*effort*) e nível de frustração (*frustration*). A segunda parte deste método passa por o utilizador ponderar cada uma das seis dimensões consoante as que considera mais ou menos relevantes. De forma a tornar todo o processo de testes mais rápido e prático decidiu-se eliminar a segunda parte do processo, tendo-se realizado uma versão simplificada que tem o nome de Raw TLX [20].

O System Usability Scale (SUS) é um questionário de dez perguntas desenvolvido para avaliar a usabilidade de diferentes tipos de sistemas. O questionário mede três aspetos principais, a eficácia, a eficiência e a satisfação do sistema. Os participantes respondem a cada pergunta numa escala de 1 a 5 e o resultado final é convertido numa pontuação de 0 a 100, permitindo a comparação entre diferentes sistemas. Apesar de simples, este método oferece uma visão abrangente da experiência do utilizador [3].

A utilização destes dois formulários standard nos testes de validação do simulador de soldadura é essencial pois garantem uma análise objetiva, consistente e comparável da experiência do utilizador. Tanto o NASA TLX como o SUS já foram amplamente testados e validados, permitindo que os resultados obtidos possam ser comparados com outros estudos e sistemas similares. A utilização destes questionários oferece credibilidade aos dados, assegurando que cada utilizador avalie de forma estruturada e baseada em critérios bem definidos o simulador. Futuras melhorias ao simulador podem também ser implementadas tendo como base os resultados obtidos por estes questionários.

De forma a obter resultados confiáveis e comparáveis foi necessário criar uma metodologia para os testes de validação do simulador cuidadosamente delineada. Cada etapa da metodologia desempenha um papel fundamental na obtenção de resultados confiáveis e comparáveis. As etapas da metodologia são as seguintes:

1. **Introdução ao simulador e consentimento do utilizador:** Inicialmente é feita uma introdução ao simulador e o seu enquadramento no projeto da dissertação. O participante inicia o preenchimento do formulário com o fornecimento do seu consentimento para a realização dos testes e a recolha e utilização de dados. Este consentimento é essencial para assegurar a transparência e ética na investigação.
2. **Recolha de dados demográficos:** Segue-se a continuação do preenchimento do formulário com os dados demográficos do utilizador. Estes dados incluem faixa etária, género e nível de ensino e também a experiência do utilizador com soldadura, realidade virtual, videojogos e simuladores. Estes dados são importantes pois ajudam a contextualizar os resultados

obtidos, permitindo averiguar se determinados perfis de utilizadores apresentam tendências ou padrões que influenciem a interação e eficácia do simulador.

3. **Explicação da metodologia e divisão dos participantes em grupos:** De seguida, a metodologia do teste é explicada ao participante, que é seguidamente colocado num de dois grupos. Esta separação tem um impacto fundamental na ordem pela qual o utilizador irá realizar o teste de soldadura. Integrantes do grupo 1 irão realizar as mesmas tarefas que os integrantes do grupo 2, mas numa ordem diferente. Esta divisão foi realizada de modo a que a familiarização do utilizador adquirida através da utilização do simulador não afete de forma muito significativa os resultados obtidos.
4. **Fase de familiarização com o simulador:** Antes de iniciar o teste principal, o utilizador tem um período de 5 minutos de uso livre do simulador. Este período tem como objetivo ajudar o participante a aprender os comandos de navegação e utilização do simulador, como também fornecer alguma familiaridade ao ambiente virtual onde irá realizar os testes. Este tempo de adaptação permite reduzir obstáculos iniciais de utilização do simulador que poderiam influenciar os resultados.
5. **Visionamento da demonstração do processo de soldadura:** Após o participante se sentir confortável no ambiente virtual e com os comandos do simulador a próxima etapa dos testes é o visionamento da demonstração do processo de soldadura. Esta demonstração tem como principal objetivo proporcionar um referencial visual e claro da realização ideal do processo de soldadura.
6. **Execução do teste de soldadura:** Segue-se a etapa central do teste, a realização dos processos de solda. Esta etapa depende da divisão em grupos feita anteriormente. Se o participante pertencer ao grupo 1 irá realizar uma solda com guia seguida de uma solda sem guia. Caso o participante pertença ao grupo 2 irá realizar primeiro a solda sem guia e depois a solda com guia. A realização desta divisão garante que os resultados obtidos dos dados de soldadura capturados sejam influenciados o menos possível pela familiarização que o utilizador adquiriu até ao momento com o simulador e sim por influência do holograma de guia na execução dos processos de soldadura. Após cada processo de solda ser realizado é gerado um relatório de avaliação de soldadura para análise posterior.
7. **Formulário pós-teste:** Após a realização dos testes, o participante completa o formulário previamente iniciado com questões acerca da clareza da demonstração, facilidade da soldadura com guia holográfico, confiança na soldadura sem guia e dificuldades encontradas e os questionários standard previamente abordados, o NASA TLX e o SUS. Após responder a todas as questões do formulário o participante tem a opção de fornecer sugestões e percepções sobre a sua experiência com o simulador.

Para todos os testes realizados, seguiu-se a metodologia apresentada. A aplicação Google Forms foi utilizada para a criação e aplicação do questionário, garantindo um processo de recolha

de dados estruturado e eficiente (ver Anexo A). Com o intuito de complementar a descrição da metodologia, foi ainda criado um vídeo ilustrativo que demonstra o processo de realização de um teste, o vídeo produzido em colaboração com Vítor Santos. O vídeo pode ser consultado em: <https://www.youtube.com/watch?v=JTSPewlQ2LM>.

4.2 Resultados

Nesta secção apresentam-se os resultados dos testes de validação do simulador de soldadura. Os resultados obtidos a partir dos dados demográficos dos participantes foram utilizados para criar a tabela 4.1 que apresenta um sumário das respostas dos participantes às diferentes categorias analisadas. Estas categorias incluem variáveis como a faixa etária, o género, o nível de escolaridade e o nível de experiência do participante com soldadura, tecnologia VR, videojogos e simuladores. A tabela apresenta o número de participantes de cada grupo e do total que respondeu de determinada forma à pergunta. Estes dados são essenciais para contextualizar os resultados obtidos, permitindo observar se ocorrem padrões de interação com o simulador em função de alguma das categorias demográficas analisadas.

Para facilitar a compreensão e interpretação dos dados recolhidos e apresentados na tabela 4.1 foram criados gráficos que facilitam a visualização das informações recolhidas. A utilização de gráficos permite identificar tendências e padrões de forma mais intuitiva, tornando a comparação dos dados recolhidos entre grupos mais simples. Os impactos na interação dos participantes com o simulador de soldadura devido às diferenças demográficas entre os participantes podem ser mais facilmente visualizados através dos gráficos criados.

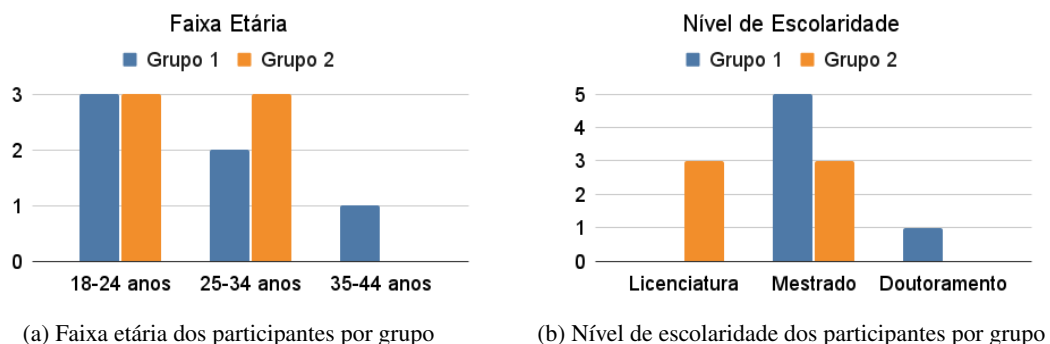


Figura 4.1: Distribuição da faixa etária e nível de escolaridade dos participantes por grupo

Tal como é possível observar pela tabela e pelo gráfico da figura 4.1a, a maioria dos participantes pertence à faixa etária dos 18 aos 24 anos, representando um total de 6 participantes. Segue-se a faixa etária dos 25 aos 34 anos que conta com 5 participantes no total, enquanto que a faixa etária dos 35 aos 44 anos apenas conta com 1 participante. Quanto à distribuição pelos grupos, esta é bastante equilibrada entre os grupos, sendo que o grupo 1 e o grupo 2 apresentam o mesmo número de participantes na faixa etária dos 18 aos 24 anos com 3 indivíduos cada. O grupo 1 inclui 2 participantes na faixa etária dos 25 aos 34 anos e 1 participante na faixa etária dos 35 aos

Tabela 4.1: Resumo dos Dados Demográficos dos Participantes

Dado	Grupo 1	Grupo 2	Total
Faixa Etária			
18-24 anos	3	3	6
25-34 anos	2	3	5
35-44 anos	1	0	1
Gênero			
Masculino	4	6	10
Feminino	2	0	2
Nível de Escolaridade			
Licenciatura	0	3	3
Mestrado	5	3	8
Doutoramento	1	0	1
Experiência com Soldadura			
Nenhuma	2	3	5
Básica	4	3	7
Experiência com VR			
Nenhuma	2	3	5
Básica	2	2	4
Moderada	2	0	2
Avançada	0	1	1
Experiência com Videojogos			
Básica	1	0	1
Moderada	3	4	7
Avançada	2	2	4
Experiência com Simuladores			
Nenhuma	0	2	2
Básica	2	1	3
Moderada	4	3	7

44 anos, enquanto que o grupo 2 apresenta 3 participantes na faixa etária dos 25 aos 34 anos e nenhum na faixa etária dos 35 aos 44 anos.

O gráfico da figura 4.1b apresenta a distribuição dos participantes segundo o seu nível de escolaridade. A maioria dos participantes possui um grau académico elevado, com 8 participantes detentores de um mestrado, dos quais 5 pertencem ao grupo 1 e os restantes 3 ao grupo 2, e 3 participantes com licenciatura, todos pertencentes ao grupo 2. O único participante com doutoramento pertence ao grupo 1.

Os participantes dos testes são maioritariamente do género masculino, tal como é possível observar nos gráficos apresentados na figura 4.2, cerca de 83% dos participantes são do género masculino, o que corresponde a 10 dos 12 participantes. Apenas 2 dos participantes são do género feminino e ambas fazem parte do grupo 2. O grupo 1 apenas apresenta indivíduos do género masculino.

Foram criados os gráficos apresentados na figura 4.3 para melhor apresentar as experiências

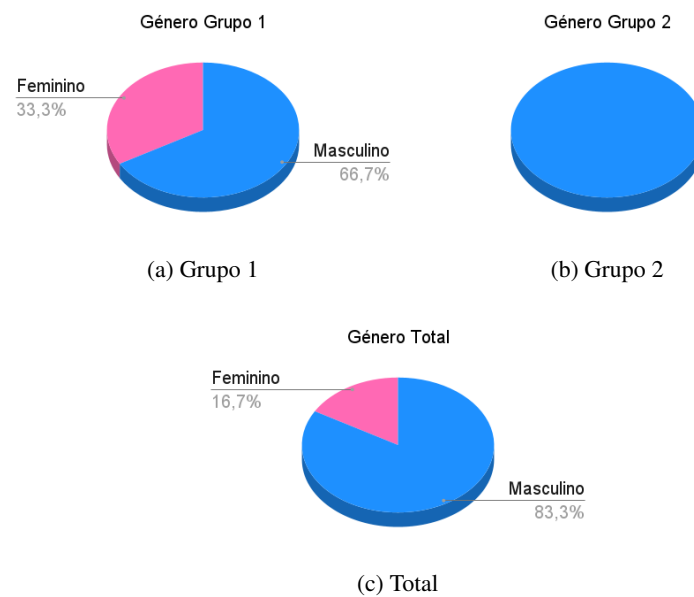


Figura 4.2: Distribuição de género dos participantes

prévias dos participantes com soldadura, realidade virtual, videojogos e simuladores. No geral a experiência dos participantes com soldadura era baixa, sendo que 5 não tinham nenhuma experiência e os restantes 7 apenas apresentavam conhecimentos básicos. O grupo 1 apresenta 2 participantes sem nenhuma experiência de soldadura e 4 com um nível básico de experiência, o grupo 2 apresenta o mesmo número de participantes sem experiência e com nível de experiência básico, que é 3. Quanto à experiência com realidade virtual o grupo 1 apresenta 2 participantes com nenhuma experiência com esta tecnologia, 2 com um nível básico e outros 2 com nível moderado de experiência. Enquanto que o grupo 2 apresenta 3 participantes com nenhuma experiência, 2 com um nível básico e 1 com um nível avançado de experiência com esta tecnologia. No que toca à experiência com videojogos, a maioria dos participantes, 7 dos 12 participantes, tem experiência moderada, apenas 1 participante tem nível de experiência básica e os restantes 4 dizem ter experiência avançada com videojogos. Relativamente à experiência com videojogos, o grupo 1 é composto por 1 participante com experiência básica, 3 com experiência moderada e 2 com experiência avançada, já o grupo 2 conta com 4 participantes com experiência moderada e 2 com experiência avançada. Finalmente, no que toca à experiência com simuladores, 7 participantes consideram ter experiência moderada na sua utilização, 3 consideram ter experiência básica e 2 consideram não ter nenhuma experiência com simuladores. Quanto à experiência com simuladores, o grupo 1 conta com 2 participantes com experiência básica e 4 com experiência moderada e o grupo 2 inclui 2 participantes sem nenhuma experiência, 1 com experiência básica e 3 com experiência moderada.

Tal como os dados demográficos foram apresentados recorrendo a uma tabela sumária, realizou-se também a criação de uma tabela sumária dos parâmetros de soldadura obtidos pelo simulador durante os testes. A tabela 4.2 apresenta as médias dos parâmetros de soldadura de cada tipo de soldadura realizado durante os testes, com guia e sem guia, por parte de cada grupo. Para cada

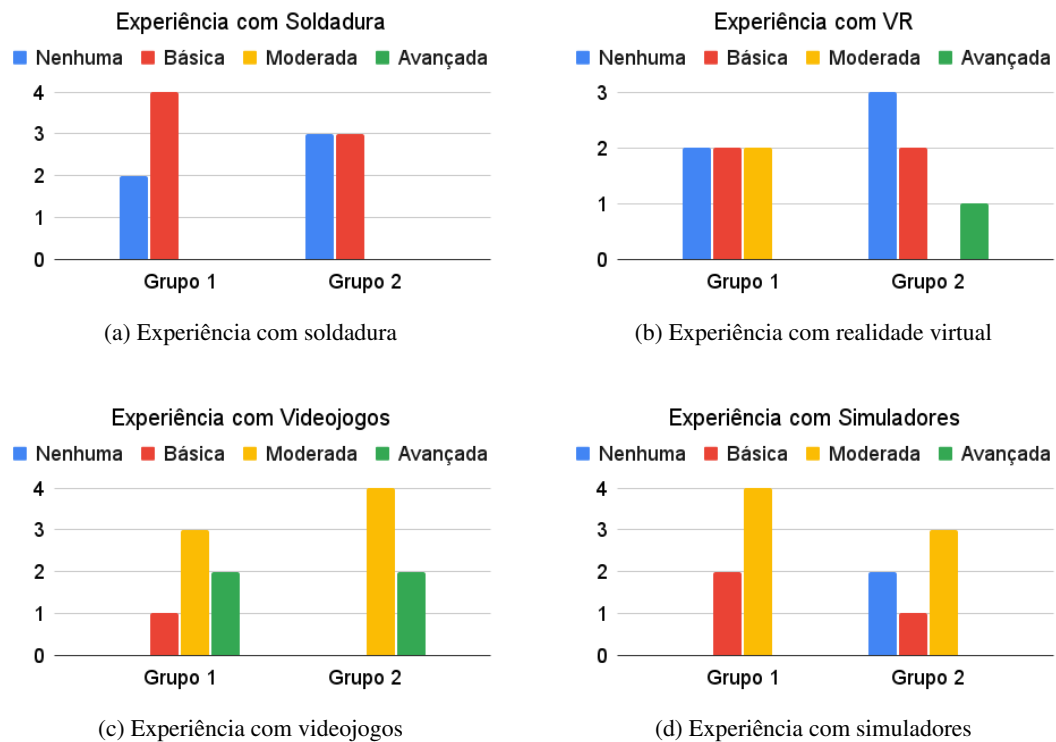


Figura 4.3: Experiências dos participantes

grupo e tipo de soldadura (com guia e sem guia) são apresentadas as médias dos valores médios dos parâmetros de soldadura guardados ao longo dos testes. Para os parâmetros em que uma grande variabilidade dos seus valores pode surgir, como é o caso do ângulo de trabalho, ângulo de deslocamento, distância à peça, velocidade e tamanho do arame, também são apresentados os valores das médias das medianas para estes parâmetros com o objetivo de diminuir o impacto de *outliers*.

Tal como é possível observar através da análise da tabela os testes com guia registaram uma percentagem média de progresso superior aos testes realizados sem guia, com o grupo 1 a apresentar a taxa de progresso mais elevada (71.17%). Os tempos médios de execução dos testes foram superiores nos testes sem guia e foram mais próximos do valor ideal de 47 segundos nos testes com guia. No que respeita ao ângulo de trabalho, ambos os grupos independentemente da presença ou não de guia, apresentam valores próximos do valor ideal de 45°. Tal como os valores dos ângulos de trabalho, ambos os grupos apresentaram valores do ângulo de deslocamento que se encontram próximos do valor ideal de -10° independentemente da presença ou não de guia. Quanto à distância à peça, os valores médios deste parâmetro são superiores a 2,2 cm o que está fora da gama de valores ideais. Os testes com guia parecem ter promovido um maior distanciamento da tocha à peça de trabalho, especialmente no grupo 1. A velocidade de soldadura apresenta valores médios muito inferiores aos esperados, próximos de 7,2 mm/s o que sugere uma implementação incorreta no seu cálculo, situação que será abordada na Secção 4.3. Por fim, o tamanho do arame manteve-se relativamente constante entre os grupos e condições.

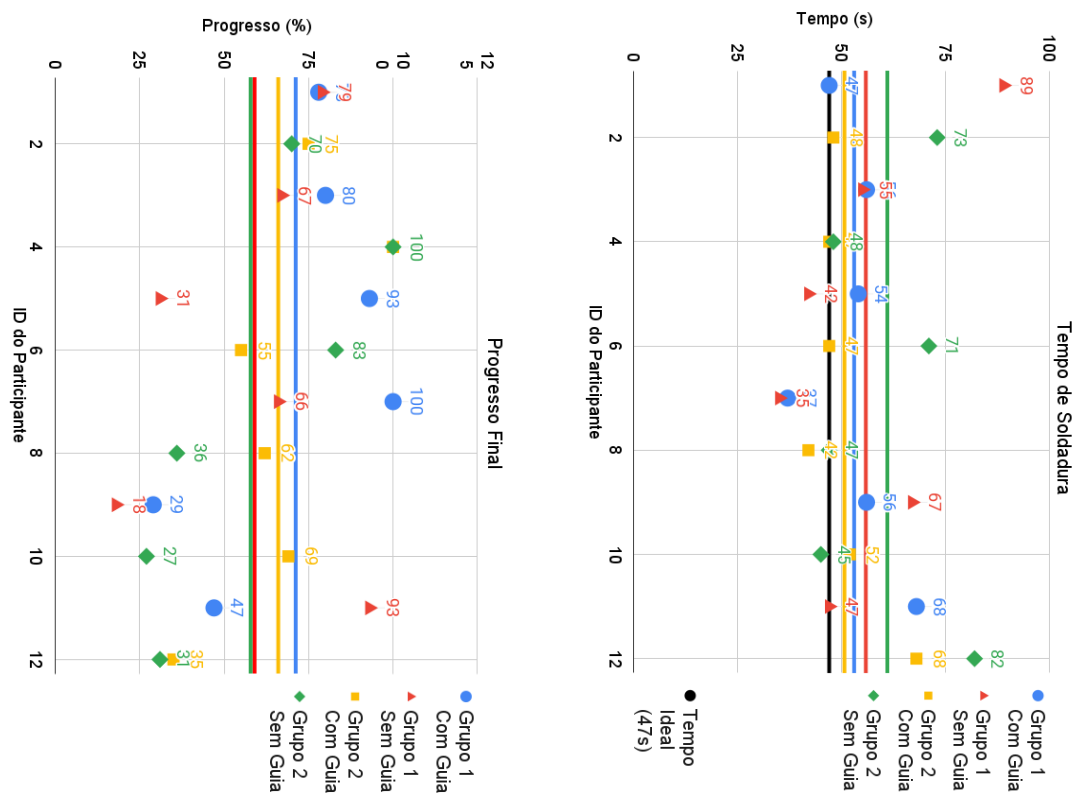
Tabela 4.2: Resumo estatístico dos parâmetros de soldadura registados nos testes

Parâmetro	Grupo 1 Com Guia	Grupo 1 Sem Guia	Grupo 2 Com Guia	Grupo 2 Sem Guia
Progresso (%)	Média: 71,17	59	66,00	57,83
Tempo (s)	53,00	55,83	50,67	61
Ângulo de Trabalho (°)	Média das médias: 44,66 / Média das medianas: 40,97	43,18/ 42,32	43,36 / 43,55	44,23 / 44,34
Ângulo de Deslocamento (°)	-13,00 / -12,72	-14,40 / -14,06	-9,15 / -8,42	-11,73 / -11,54
Distância à Peça (cm)	2,87 / 2,62	2,57 / 2,37	2,23 / 2,04	2,36 / 2,35
Velocidade (mm/s)	2,19/ 1,67	2,01 / 1,48	2,28 / 1,57	2,54 / 2,07
Tamanho do Arame (cm)	1,87 / 1,91	1,18 / 1,16	1,06 / 1,10	1,19 / 1,10

Com o intuito de permitir uma análise comparativa direta do desempenho individual de cada participante foram criados gráficos que apresentam a média para os principais parâmetros avaliados durante os testes (progresso final, tempo de soldadura, ângulo de trabalho, ângulo de deslocamento e distância da peça) de cada participante para cada tipo de soldadura feita (com guia e sem guia). Para além dos valores dos participantes foram incluídas retas horizontais de referência com as médias de cada grupo para cada tipo de soldadura. Quando aplicável também foi colocada uma linha horizontal de referência para o valor ideal do parâmetro. Estes elementos visuais permitem identificar intuitivamente a variação entre a prestação dos diferentes participantes e a proximidade do seu desempenho às metas ideais. A perceção de padrões e tendências dos participantes através dos gráficos permite tirar conclusões mais assertivas dos dados quantitativos obtidos. Estes gráficos estão apresentados nas figuras 4.4 e 4.5.

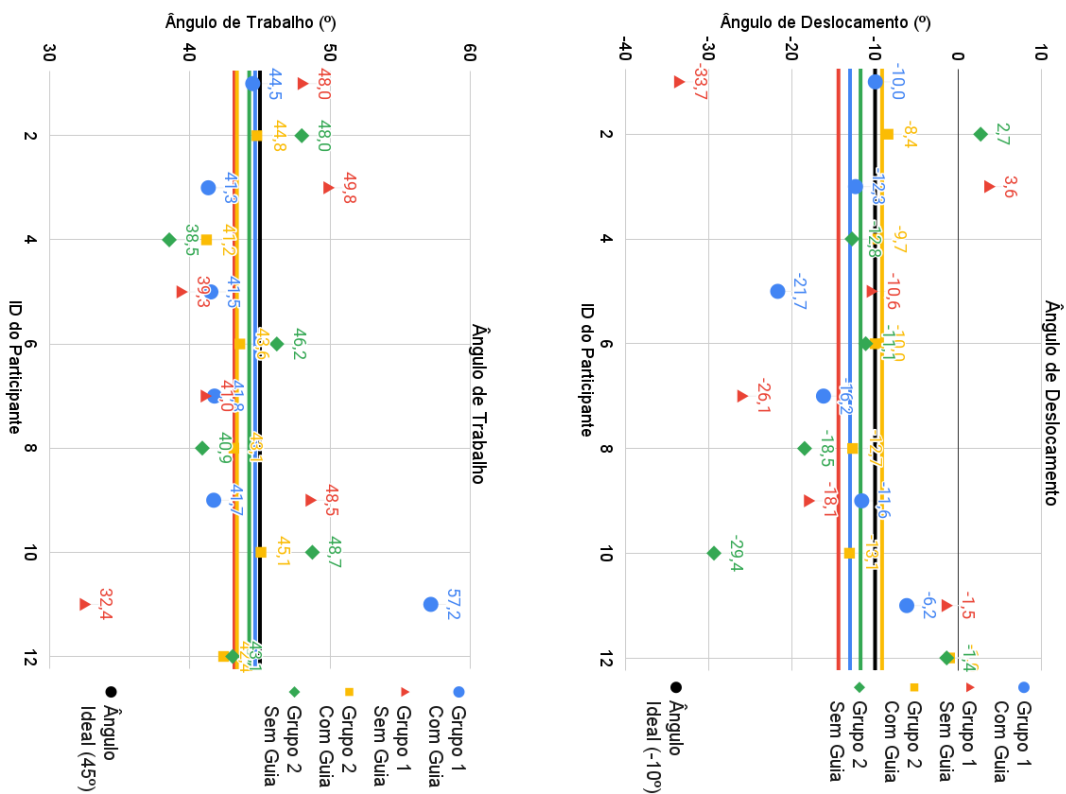
Tal como o resto dos dados recolhidos até agora, os dados dos formulários realizados após os testes, utilizados para a avaliação qualitativa do simulador foram resumidos utilizando as tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. A tabela 4.3 apresenta as médias, o desvio padrão, o valor máximo e o valor mínimo das respostas por grupo às questões que abordam a clareza da demonstração, a facilidade na soldadura com guia, confiança na execução da soldadura sem guia e as dificuldades gerais sentidas pelos participantes.

Os resultados do formulário apresentado na tabela 4.3 demonstram valores elevados na clareza da demonstração e na facilidade de soldadura com guia e valores médios mais baixos na confiança na soldadura e nas dificuldades gerais encontradas. Os valores baixos de desvio padrão nas respostas indica que houve consistência nas respostas dos participantes.



(a) Progresso final por participante – comparação com e sem guia

(b) Tempo de soldadura por participante – comparação com e sem guia



(c) Ângulo de trabalho por participante – comparação com e sem guia

(d) Ângulo de deslocamento por participante – comparação com e sem guia

Figura 4.4: Parâmetros registados por participante – comparação com e sem guia

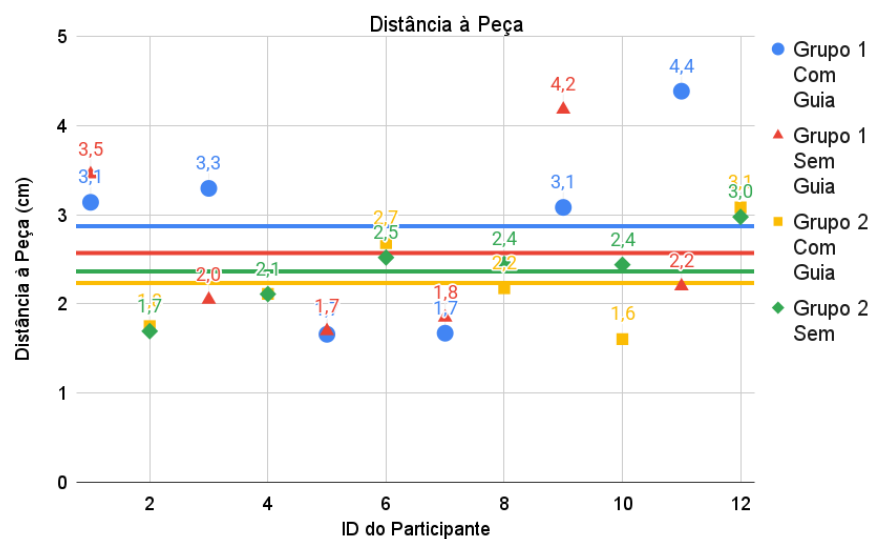


Figura 4.5: Distância média à peça por participante – comparação com e sem guia

Tabela 4.3: Estatísticas das respostas qualitativas por grupo (escala de 1 a 5)

Grupo	Pergunta	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Grupo 1	Clareza Demonstração	4,67	0,52	4	5
	Facilidade Solda Guiada	4,17	0,98	3	5
	Confiança Solda Não Guiada	3,50	0,55	3	4
	Dificuldades Gerais	2,67	1,03	1	4
Grupo 2	Clareza Demonstração	4,83	0,41	4	5
	Facilidade Solda Guiada	4,50	0,83	3	5
	Confiança Solda Não Guiada	3,16	0,40	3	4
	Dificuldades Gerais	3,17	1,21	1	4

Os resultados do questionário NASA TLX foram organizados na tabela 4.4, permitindo avaliar a carga de trabalho percebida pelos participantes durante os testes. Para cada grupo foram calculadas as médias, desvios padrão, valores mínimos e máximos para as seis dimensões do NASA TLX e o valor agregado global.

Relativamente aos resultados apresentados na tabela 4.4, o grupo 1 apresentou uma carga de trabalho percebida mais elevada, destacando-se as dimensões de *mental demand*, *temporal demand* e *effort*. As dimensões *physical demand* e *frustration* mantiveram-se em níveis baixos. O grupo 2 apresentou uma carga de trabalho percebida mais baixa, obtendo pontuações inferiores às do grupo 1 na maioria das dimensões e um *total workload score* médio de 4,39, inferior ao do grupo 1 de 6,06.

Os resultados do questionário SUS encontram-se resumidos na tabela 4.5, permitindo avaliar a percepção dos participantes quanto à usabilidade do simulador de soldadura. Foram calculadas, para cada grupo, as médias, os desvios padrão, os valores máximos e os valores mínimos obtidos dos resultados do questionário.

Tabela 4.4: Estatísticas das respostas ao NASA TLX

Grupo	Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Grupo 1	Mental Demand	5.33	3.98	0	10
	Physical Demand	1.83	2.23	0	5
	Temporal Demand	5.50	5.05	0	10
	Performance	15.17	3.19	10	20
	Effort	5.83	4.92	0	10
	Frustration Level	2.67	2.34	0	5
	Total Workload Score	6.06	2.76	3.33	9.17
Grupo 2	Mental Demand	3.00	1.67	0	5
	Physical Demand	2.33	1.63	0	4
	Temporal Demand	3.67	3.44	1	10
	Performance	11.17	7.52	4	19
	Effort	4.67	2.58	1	9
	Frustration Level	1.50	1.97	0	5
	Total Workload Score	4.39	1.37	2.67	6.50

Os resultados médios indicados pelos grupos foram muito elevados com 85.00 pontos para o Grupo 1 e 88.33 para o Grupo 2. A média global foi de 86.67 e os baixos desvios padrão demonstram que houve uma grande uniformidade nas respostas dentro de cada grupo. A nota mais baixa dada ao simulador foi de 75 pontos.

4.3 Discussão

A presente Secção tem como objetivo interpretar e refletir nos resultados obtidos nos testes de validação do simulador de soldadura. A análise será feita procurando compreender a eficácia dos diferentes componentes do simulador, a percepção dos utilizadores e fatores que possam influenciar o seu desempenho e experiência. Serão explorados os dados quantitativos e qualitativos, procurando identificar padrões, limitações e oportunidades de melhoria. Também serão consideradas as sugestões e percepções sobre a experiência com o simulador fornecidas pelos participantes.

Os dados quantitativos obtidos durante os testes sugerem que a utilização do holograma de guia teve um impacto positivo, principalmente na taxa de progresso final obtida e no tempo de execução, como é demonstrado pelos valores médios de progresso superiores e tempos de execução mais próximos do ideal nos testes com guia, em comparação com os testes sem guia, independentemente da ordem de realização dos mesmos. O ângulo de trabalho e o ângulo de deslocamento estiveram muito próximos dos valores ideais nas soldaduras realizadas com e sem guia por cada grupo o que pode indicar que estes parâmetros são mais facilmente interiorizados. Esta consistência pode também indicar que a demonstração do processo de soldadura e o *feedback* fornecido pela interface gráfica beneficiaram significativamente a orientação da tocha MIG/MAG no espaço.

Por outro lado, parâmetros como a distância à peça e a velocidade de soldadura apresentaram valores fora da gama de valores ideais. No caso da distância à peça de soldadura, os valores médios elevados sugerem que o *feedback* para o ajuste deste parâmetro não foi suficiente ou ideal,

Tabela 4.5: Estatísticas das respostas ao SUS

Grupo	Média SUS	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Grupo 1	85.00	8.06	75	95
Grupo 2	88.33	4.38	82.5	95
Total	86.67	6.42	75	95

sendo assim um aspeto a ter em consideração no trabalho futuro. Quanto aos valores de velocidade média, estes são muito inferiores aos esperados e sugerem uma possível falha na implementação da sua medição. Com os valores obtidos para o tempo de execução e o tamanho da peça é possível calcular o valor médio da velocidade de execução, utilizando este método para calcular a velocidade no caso em que o tempo de execução é mais elevado, que resulta numa velocidade média inferior, obtém-se o valor de aproximadamente $5,6 \text{ mm/s}$ que é muito superior ao obtido pela média das velocidades instantâneas de $2,54 \text{ mm/s}$. Esta relação inversa entre o tempo e a velocidade permite validar a suspeita de que a medição direta da velocidade pode ter sido incorretamente implementada. O facto de os testes com tempos de execução menores não apresentarem velocidades médias mais elevadas também sugere inconsistência nos cálculos realizados pelo sistema.

A análise das respostas ao questionário NASA TLX revela que o grupo 1 reportou uma carga de trabalho ligeiramente superior à do grupo 2, especialmente nas dimensões *Mental Demand*, *Temporal Demand* e *Performance*, o que pode estar relacionado com a ordem das tarefas realizadas. Apesar disso, os níveis de *Physical Demand* e *Frustration* foram relatados como baixos, o que indica que o uso do simulador não gerou desconforto físico nem elevados níveis de frustração. De um modo geral, os resultados sugerem que o simulador ofereceu um nível de desafio adequado, sem comprometer o conforto ou a motivação do utilizador.

O questionário SUS revelou uma percepção bastante positiva da usabilidade por parte dos participantes. Ambos os grupos indicaram pontuações médias superiores a 85, com desvio padrão reduzido, o que demonstra uma opinião positiva e consistente relativamente à usabilidade do simulador. Estes dados indicam que o simulador foi considerado intuitivo, eficiente e acessível. O facto de os resultados do questionário SUS serem tão elevados valida várias decisões tomadas no desenvolvimento do simulador, desde o design da interface do utilizador até aos sistemas de demonstração e guia.

Para além das respostas aos questionários, alguns participantes escreveram comentários e sugestões acerca da sua percepção sobre a experiência de utilização do simulador. Vários utilizadores referiram que a ausência de *feedback* no contacto da tocha MIG/MAG com a peça de trabalho dificultou a percepção da distância à peça. Foi sugerida a introdução de *feedback* háptico como forma de indicar o contacto da tocha MIG/MAG com a peça de trabalho. Apesar destas observações, os participantes destacaram a facilidade de uso do simulador e reconheceram o seu potencial enquanto ferramenta de treino.

A principal limitação presente no estudo realizado é o número reduzido de participantes, o que limita a generalização dos resultados e condiciona a aplicação de testes estatísticos. Outra limitação observada foi a homogeneidade dos participantes no que toca à experiência com soldadura,

visto não haver nenhum utilizador com experiência moderada ou avançada neste tipo de atividade, dificultando a identificação de padrões de desempenho relacionados com o grau de experiência dos utilizadores.

Apesar das limitações, os resultados obtidos mostram que o simulador apresenta grande potencial de aplicação na formação de novos soldadores. A combinação de *feedback* em tempo real, ambiente imersivo e parâmetros objetivos de desempenho proporciona ao utilizador um sistema eficaz para o treino de competências práticas de soldadura, com vantagens em termos de segurança, sustentabilidade e acessibilidade. A perceção extremamente positiva da usabilidade do sistema em conjunto com a capacidade do simulador capturar parâmetros técnicos detalhados, tornam o simulador desenvolvido uma ferramenta promissora tanto para iniciantes como para profissionais. Em ambientes de formação técnica, este tipo de simulador pode reduzir custos associados ao consumo de materiais e riscos operacionais, ao mesmo tempo que promove a aprendizagem autónoma baseada em tentativa e erro num ambiente seguro. Os resultados obtidos validam a pertinência do projeto e abrem caminho a futuras melhorias e a aplicação de sistemas similares nouro tipo de atividades de formação técnica.

4.4 Conclusão

Este capítulo permitiu validar o desempenho e a usabilidade do simulador de soldadura desenvolvido. A realização de uma metodologia rigorosa na aplicação dos testes de validação do sistema e a utilização de questionários standard validados e amplamente reconhecidos permitiu a recolha de dados quantitativos e qualitativos que demonstram a eficácia do simulador de soldadura.

Os resultados revelaram um melhor desempenho dos participantes quando estes realizaram o processo de soldadura com a ajuda do holograma de guia, situação em que houve uma perceção muito positiva da usabilidade do simulador, expressa pela elevada pontuação obtida no questionário SUS. A análise do questionário NASA TLX indicou que a carga cognitiva do simulador foi adequada, sem comprometer o conforto e a experiência do utilizador. Também foram identificadas limitações no sistema e nos testes, nomeadamente na implementação do cálculo da velocidade de soldadura e na homogeneidade de experiência dos participantes nos testes.

É possível concluir que o simulador apresenta um forte potencial como ferramenta eficaz para formação e treino em soldadura. O simulador fornece uma experiência acessível, envolvente e tecnicamente relevante. Os padrões observados durante os testes e o *feedback* fornecido pelos participantes oferecem orientações valiosas que servem de guia para o seu desenvolvimento contínuo.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo é realizada uma reflexão final sobre o trabalho desenvolvido ao longo da dissertação, que teve como principal objetivo o desenvolvimento de um simulador de soldadura em realidade virtual. Ao longo do capítulo são analisados os objetivos propostos, discutindo-se em que medida foram atingidos e de que forma foram concretizados ao longo do desenvolvimento do projeto. São também abordadas neste capítulo possíveis linhas de continuidade do desenvolvimento do projeto, identificando oportunidades de melhoria que poderão ser exploradas em trabalhos futuros.

5.1 Satisfação dos Objetivos

A presente dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um simulador de soldadura em realidade virtual com o propósito de apoiar a formação prática de novos soldadores. Este objetivo surge como resposta à escassez de profissionais qualificados na área da soldadura, agravada pelos custos de formação elevados e pelos riscos associados a esta atividade. Neste contexto, a utilização de tecnologias imersivas, como a realidade virtual, apresenta-se como uma solução inovadora.

Os objetivos definidos no início da dissertação foram cumpridos. Foi inicialmente realizado um levantamento das metodologias de ensino da soldadura, permitindo compreender os fundamentos técnicos e as falhas da formação tradicional de novos soldadores. Este estudo foi fundamental, pois serviu de guia para o desenvolvimento do simulador. Posteriormente, realizou-se a configuração do equipamento e das ferramentas de desenvolvimento. Esta etapa inclui a seleção do *hardware* e *software* apropriado, tendo sido feito um reaproveitamento e extensão de um simulador anteriormente desenvolvido no INESC TEC. Na seguinte fase, foram desenvolvidas experiências práticas com diferentes níveis de dificuldade acompanhadas de alertas visuais para auxílio do aprendiz em tempo real, sendo o sistema de demonstração e guia o elemento que mais contribuiu para alcançar estes objetivos. Outro contributo fundamental foi a implementação de algoritmos de monitorização dos principais parâmetros de soldadura e de geração de relatório de

avaliação de soldadura. Esta monitorização em tempo real e os relatórios são essenciais na personalização da formação, permitindo ao utilizador identificar áreas de melhoria e acompanhar a sua evolução de forma objetiva. A fase final do projeto consistiu na validação do simulador com a realização de testes rigorosos. A metodologia bem definida que combinou dados quantitativos e qualitativos e a utilização de questionários reconhecidos como o SUS e o NASA TLX, para a obtenção dos dados qualitativos, contribuíram para conferir maior validade e fiabilidade aos testes realizados. Os resultados obtidos confirmam a eficácia do simulador, tendo os participantes obtido melhor desempenho com o auxílio de guia, relatado baixos níveis de frustração e carga física e classificado a usabilidade do sistema com pontuações muito elevadas. Estes indicadores validam não só o simulador desenvolvido como também a proposta pedagógica associada ao projeto. Apesar de terem sido identificadas algumas limitações, estas não comprometem a validade do trabalho realizado e acabam por oferecer orientações concretas para futuras melhorias.

5.2 Trabalho Futuro

Apesar dos resultados positivos obtidos, há várias oportunidades de evolução para o simulador de soldadura desenvolvido. Uma das principais prioridades deverá ser a correção da medição da velocidade de soldadura, de modo a garantir maior fiabilidade nos dados recolhidos. Também seria relevante introduzir mecanismos que melhorem a perceção da profundidade por parte do utilizador, como por exemplo a introdução de *feedback* háptico, que poderia ajudar o utilizador a ter uma melhor perceção relativamente ao contacto da tocha MIG/MAG com a peça de trabalho. No futuro também seria interessante a realização de testes com participantes experientes em soldadura, para avaliar o desempenho do simulador em contextos de formação profissional real.

Em trabalho futuro seria importante diversificar o tipo de processo de soldadura que o simulador é capaz de realizar e o tipo e a posição da peça a soldar. Este aumento de funcionalidades tornaria o sistema mais versátil e aplicável a um maior número de cenários industriais. Por fim, seria benéfico explorar a aplicação do simulador noutros contextos de formação técnica, como carpintaria, manutenção industrial e segurança no trabalho, aproveitando a estrutura modular do simulador desenvolvido. Estudos comparativos entre os métodos tradicionais de formação e a abordagem em realidade virtual também poderiam reforçar a validade do sistema e apoiar a sua integração em programas de ensino formal.

Referências

- [1] European Labour Authority. *Report on labour shortages and surpluses 2023*. Publications Office of the European Union, 2024.
- [2] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, e B. MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6):34–47, 2001.
- [3] Aaron Bangor, Philip T. Kortum, e James T. Miller and. An empirical evaluation of the system usability scale. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 24(6):574–594, 2008.
- [4] Gonzalo Barranco. How to make a Hologram Shader in Unity with HLSL, janeiro 2024.
- [5] Doug A. Bowman e Ryan P. McMahan. Virtual reality: How much immersion is enough? *Computer*, 40(7):36–43, 2007.
- [6] María A. Bretos, Sergio Ibáñez-Sánchez, e Carlos Orús. Applying virtual reality and augmented reality to the tourism experience: a comparative literature review. *Spanish Journal of Marketing - ESIC*, 28(3):287–309, janeiro 2024. Publisher: Emerald Publishing Limited.
- [7] Vei Siang Chan, Habibah Norehan Hj Haron, Muhammad Ismail Bin Mat Isham, e Farhan Bin Mohamed. Vr and ar virtual welding for psychomotor skills: a systematic review. *Multimedia Tools and Applications*, 81(9):12459–12493, 2022.
- [8] Pietro Cipresso, Irene Alice Chicchi Giglioli, Mariano Alcañiz Raya, e Giuseppe Riva. The past, present, and future of virtual and augmented reality research: A network and cluster analysis of the literature. *Frontiers in Psychology*, 9, 2018.
- [9] The Lincoln Electric Company. VRTEX® 360+ Dual User Virtual Reality Welding Training Simulator on Pallet. Available at <https://www.lincolnelectric.com/en/products/k4602-1>.
- [10] HTC Corporation. VIVE Pro 2 Headset - High-Resolution Virtual Reality for PC. Available at <https://www.vive.com/us/product/vive-pro2/overview/>.
- [11] HTC Corporation. VIVE Pro 2 Specs | VIVE United States. Available at <https://www.vive.com/us/product/vive-pro2/specs/>.
- [12] Gabriel de Moura Costa, Marcelo Roberto Petry, e Antônio Paulo Moreira. Augmented reality for human–robot collaboration and cooperation in industrial applications: A systematic literature review. *Sensors*, 22(7), 2022.
- [13] Cythero. Welding Simulator. Available at <https://weldvr.com/>.

- [14] Manuel Bento Barbosa do Couto. Virtual reality applied to welder training. Tese de mestrado, Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2023.
- [15] Zhao Du, Jun Liu, e Tianjiao Wang. Augmented reality marketing: A systematic literature review and an agenda for future inquiry. *Frontiers in Psychology*, 13, 2022.
- [16] EWI. Gas metal arc welding basics: Travel speed and contact-to-work distance (ctwd), 2024. Available at <https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-travel-speed-and-contact-to-work-distance-ctwd>
- [17] Fronius International GmbH. Welducation Simulator. Available at <https://www.fronius.com/en/welding-technology/innovative-solutions/welducation-simulator>.
- [18] Jeff Grill. 4 Main Types of Welding Processes (with diagrams), dezembro 2019. Section: Welding Basics.
- [19] D. J. Harris, T. Arthur, J. Kearse, M. Olonilua, E. K. Hassan, T. C. De Burgh, M. R. Wilson, e S. J. Vine. Exploring the role of virtual reality in military decision training. *Frontiers in Virtual Reality*, 4, 2023.
- [20] Sandra G. Hart. Nasa-task load index (nasa-tlx); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9):904–908, 2006.
- [21] Brittney Heibel, Ryan Anderson, e Merritt Drewery. Virtual reality in welding training and education: A literature review. *Journal of Agricultural Education*, 64(4), 2023.
- [22] H. Kato e M. Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. Em *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, páginas 85–94, 1999.
- [23] Georgios Lampropoulos, Euclid Keramopoulos, Konstantinos Diamantaras, e Georgios Evangelidis. Augmented reality and gamification in education: A systematic literature review of research, applications, and empirical studies. *Applied Sciences*, 12(13), 2022.
- [24] Miller Electric Mfg. LLC. AugmentedArc® Augmented Reality Welding System | MillerWelds. Available at <https://www.millerwelds.com/equipment/training-solutions/training-equipment/augmentedarc-augmented-reality-welding-system-m30100/>.
- [25] Melanie J. Maas e Janette M. Hughes. Virtual, augmented and mixed reality in k–12 education: a review of the literature. *Technology, Pedagogy and Education*, 29(2):231–249, 2020.
- [26] Dariusz Michalak, Magdalena Rozmus, Jarosław Tokarczyk, e Kamil Szewerda. Portable vr welding simulator. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(17), 2024.
- [27] Paul Milgram e Fumio Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12):1321–1329, 1994.
- [28] Miller Electric. A guide to the 5 basic types of weld joints and tips for improving results, 2020. Available at <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/a-guide-to-the-5-basic-types-of-weld-joints-and-tips-for-improving-results>.

- [29] Miller Welds. What are stickout (electrode extension) and contact tip to work distance?, 2019. Available at <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/what-are-stickout-electrode-extension-and-contact-tip-to-work-distance>.
- [30] Marzieh Alsadat Minouei, Athar Omid, Alireza Mirzaie, Hamid MahdaviFard, e Alireza Rahimi. Effectiveness of virtual reality on medical students' academic achievement in anatomy: systematic review. *BMC Medical Education*, 24(1):1407, dezembro 2024.
- [31] Luis Muñoz-Saavedra, Lourdes Miró-Amarante, e Manuel Domínguez-Morales. Augmented and virtual reality evolution and future tendency. *Applied Sciences*, 10(1), 2020.
- [32] Realityworks. guideWELD® VR welding simulator - Realityworks. Available at <https://www.realityworks.com/product/realcareer-guideweld-vr-welding-simulator/?v=35357b9c8fe4/>.
- [33] Vule Reljić, Ivana Milenković, Slobodan Dudić, Jovan Šulc, e Brajan Bajči. Augmented reality applications in industry 4.0 environment. *Applied Sciences*, 11(12), 2021.
- [34] Seabery. Welding Simulator | SOLDAMATIC. Available at <https://seaberyat.com/en/soldamatic/>.
- [35] Simbott. Welding Simulator India | VR Welding Training Affordable, dezembro 2021. Available at <https://simbott.com/welding-simulator/>.
- [36] Simbott. Affordable Augmented Reality Welding System For Training, outubro 2023. Available at <https://simbott.com/ar-welding/>.
- [37] Ramesh Singh. Chapter 3 - welding and joining processes. Em Ramesh Singh, organizador, *Applied Welding Engineering*, páginas 147–170. Butterworth-Heinemann, Boston, 2012.
- [38] Maximilian Speicher, Brian D Hall, e Michael Nebeling. What is mixed reality? Em *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*, páginas 1–15, 2019.
- [39] Maurice Stewart. 6 - fabrication, welding, and in-shop inspection. Em Maurice Stewart, organizador, *Surface Production Operations*, páginas 197–284. Gulf Professional Publishing, Boston, 2021.
- [40] Unity Technologies. XR Interaction Toolkit | XR Interaction Toolkit | 3.1.2.
- [41] Dafnis Cain Villagran-Vizcarra, David Luviano-Cruz, Luis Asunción Pérez-Domínguez, Luis Carlos Méndez-González, e Francesco Garcia-Luna. Applications analyses, challenges and development of augmented reality in education, industry, marketing, medicine, and entertainment. *Applied Sciences*, 13(5), 2023.
- [42] Welding of Welders. Welding speed and travel angle, 2024. Available at <https://weldingofwelders.com/welding-speed-and-travel-angle/>.
- [43] Klas Weman. *Welding processes handbook*. Elsevier, 2011.
- [44] Benkai Xie, Qiang Zhou, e Liang Yu. A real-time welding training system base on virtual reality. Em *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, páginas 309–310. IEEE, 2015.

- [45] Ungyeon Yang, Gun A Lee, Yongwan Kim, Dongsik Jo, Jinsung Choi, e Ki-Hong Kim. Virtual reality based welding training simulator with 3d multimodal interaction. Em *2010 International Conference on Cyberworlds*, páginas 150–154. IEEE, 2010.
- [46] YesWelder. Common FCAW Welding Mistakes And Defects. Available at <https://yeswelder.com/blogs/yeswelder/common-fcaw-welding-mistakes-and-defects>.
- [47] Andy Wai Kan Yeung, Anela Tosevska, Elisabeth Klager, Fabian Eibensteiner, Daniel Laxar, Jivko Stoyanov, Marija Glisic, Sebastian Zeiner, Stefan Tino Kulnik, Rik Crutzen, Oliver Kimberger, Maria Kletecka-Pulker, Atanas G Atanasov, e Harald Willschke. Virtual and augmented reality applications in medicine: Analysis of the scientific literature. *J Med Internet Res*, 23(2):e25499, Feb 2021.
- [48] Yangloucai Zhang, Muhammad Farid Azizul Bin Azizui, e Cong Yan. The Application of 6G and Augmented Reality Technology in Education and Training. *Wireless Personal Communications*, maio 2024.

Anexo A

Formulário Utilizado nos Testes

Estudo de avaliação do simulador de soldadura em realidade virtual

Bem-vindo ao estudo de avaliação do simulador de soldadura em realidade virtual. Este estudo surge no âmbito da realização do projeto de dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), sendo realizado no iilab - Laboratório de Indústria e Inovação do INESC TEC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência.

O objetivo desta investigação é avaliar a eficácia do simulador de soldadura em realidade virtual, analisando a experiência do utilizador, a carga de trabalho percebida, a usabilidade do sistema e dados recolhidos ao longo da utilização do sistema. A participação neste estudo envolve a utilização do simulador, a visualização de uma demonstração integrada do processo de soldadura, a execução de tarefas de soldadura guiadas e não guiadas, e o preenchimento de questionários padronizados para recolher feedback sobre a experiência.

Agradecemos a sua disponibilidade para contribuir para este projeto, cuja análise e resultados poderão ter impacto na evolução de sistemas de formação em soldadura utilizando tecnologias de realidade virtual.

Este formulário destina-se a recolher as suas impressões e experiências durante a utilização do sistema. O procedimento do teste inclui:

- Uma breve apresentação dos componentes e funcionalidades do sistema.
- Uma fase de utilização livre da aplicação durante 5 minutos.
- A visualização de uma demonstração integrada do processo de soldadura.
- A realização de duas soldas (numa ordem que dependerá do grupo a que pertencer).
- A resposta aos questionários NASA Task Load Index (NASA TLX) e System Usability Scale (SUS) para avaliar, respetivamente, a carga de trabalho e a facilidade de utilização do sistema.

O tempo estimado para a participação é de aproximadamente 20 minutos.

** Indica uma pergunta obrigatória*

1. Declaração de Consentimento *

Ao avançar e submeter este formulário, confirmo que fui devidamente informado sobre os objetivos do estudo, o procedimento a seguir e a natureza dos dados que serão recolhidos, os quais integram o desenvolvimento da dissertação. Estou ciente de que todas as informações fornecidas serão tratadas com a máxima confidencialidade e utilizadas exclusivamente para fins de investigação académica. Reconheço que a minha participação é totalmente voluntária e que posso desistir do estudo em qualquer momento, sem qualquer penalização ou prejuízo. Dessa forma, dou o meu consentimento informado para participar nesta investigação.

Marcar apenas uma oval.

☐ Consinto em participar

Informação Demográfica e Experiência do Participante

Antes de iniciarmos as atividades práticas, pedimos que forneça alguns dados sobre o seu perfil e a sua experiência. Esta secção tem como objetivo contextualizar os resultados do estudo, permitindo-nos correlacionar as suas respostas com a sua formação, familiaridade com a soldadura, e experiência prévia com realidade virtual. Todos os dados recolhidos serão tratados com total confidencialidade e utilizados exclusivamente para fins de investigação.

2. ID de Participante *

3. Faixa Etária *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Menos de 18 anos
- ☐ 18-24 anos
- ☐ 25-34 anos
- ☐ 35-44 anos
- ☐ 45-54 anos
- ☐ 55 anos ou mais

4. Género *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Masculino
- ☐ Feminino
- ☐ Não-binário
- ☐ Prefiro não dizer

5. Nível de Escolaridade/Formação Acadêmica *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Ensino Secundário
- ☐ Ensino Superior (Licenciatura)
- ☐ Mestrado
- ☐ Douturamento
- ☐ Outro

6. Experiência com Soldadura *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Nenhuma
- ☐ Básica
- ☐ Moderada
- ☐ Avançada

7. Experiência com Realidade Virtual (VR) *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Nenhuma
- ☐ Básica
- ☐ Moderada
- ☐ Avançada

8. Experiência com Videojogos *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Nenhuma
- ☐ Básica
- ☐ Moderada
- ☐ Avançada

9. Experiência com Simuladores *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Nenhuma
- ☐ Básica
- ☐ Moderada
- ☐ Avançada

Instruções Preliminares e Atribuição de Grupo

Antes de iniciar as atividades práticas, leia atentamente as seguintes instruções. Este estudo faz parte do projeto de dissertação e visa avaliar a experiência de utilização do simulador de soldadura em realidade virtual.

Procedimento do Teste:

1. Introdução:

Serão apresentados os componentes e funcionalidades do simulador.

2. Utilização Livre:

Terá 5 minutos para explorar livremente a aplicação.

3. Demonstração:

Assistirá à demonstração integrada do processo de soldadura.

4. Execução das Soldas:

Deverá realizar duas soldas, seguindo a ordem indicada conforme o seu grupo:

- **Grupo 1:** Solda Guiada primeiro, seguida de Solda Não Guiada.
- **Grupo 2:** Solda Não Guiada primeiro, seguida de Solda Guiada.

Certifique-se de estar atento à ordem de execução, pois esta informação é crucial para a análise dos dados recolhidos.

Atribuição de Grupo:

Para facilitar a identificação do procedimento realizado, por favor, responda às seguintes perguntas:

10. Confirmação de Entendimento *

Leu e compreendeu as instruções acima?

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Sim, compreendi.
- ☐ Não, tenho dúvidas.

11. Atribuição de Grupo *

Qual é a ordem das tarefas de soldadura que irá realizar?

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Solda Guiada primeiro, seguida de Solda Não Guiada (Grupo 1)
- ☐ Solda Não Guiada primeiro, seguida de Solda Guiada (Grupo 2)

Feedback Pós-Demonstração e Reflexões sobre o Desempenho das Soldas

Nesta secção, pretendemos recolher as suas impressões logo após a demonstração integrada e a execução das soldas. Por favor, avalie as seguintes afirmações numa escala de 1 a 5, onde:

- **1** = Nada / Muito Insatisfeito
- **5** = Extremamente / Muito Satisfeito

Avaliação da Demonstração**12. Clareza da Demonstração ***

De 1 a 5, como avaliaria a clareza da demonstração apresentada sobre o processo de soldadura?

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

Reflexões Sobre a Execução das Soldas**13. Facilidade da Solda Guiada ***

De 1 a 5, como avaliaria a facilidade de execução da solda guiada?

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

14. Confiança na Solda Não Guiada *

De 1 a 5, como avaliaria a sua confiança durante a execução da solda não guiada?

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

15. Dificuldades Encontradas *

De 1 a 5, onde 1 representa 'nenhuma dificuldade' e 5 representa 'muitas dificuldades', como avaliaria as dificuldades encontradas durante a execução das soldas?

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

16. Comentários Adicionais

Se desejar, utilize o espaço abaixo para comentar outros aspetos relacionados com a demonstração ou a execução das soldas.

NASA Task Load Index

O NASA TLX é uma ferramenta de avaliação subjetiva da carga de trabalho, permitindo medir a exigência mental, física e temporal, bem como avaliar o esforço, a frustração e a percepção de desempenho durante a execução de uma tarefa. Este questionário ajuda-nos a determinar o nível de "carga" que sentiu ao interagir com o simulador.

17. How mentally demanding was the task? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Very Low	1	2	3	4	5	6	7	8
Mental Demand	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



18. How physically demanding was the task? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Very Low	1	2	3	4	5	6	7	8
Physical Demand	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



19. How hurried or rushed was the pace of the task? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Very Low	1	2	3	4	5	6	7	8
Temporal Demand	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



20. How successful were you in accomplishing what you were asked to do? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Very Low	1	2	3	4	5	6	7
Performance	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



21. How hard did you have to work to accomplish your level of performance? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Very Low	1	2	3	4	5	6	7	8
Effort	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



22. How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you? *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Very Low	1	2	3	4	5	6	7
Frustration	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



System Usability Scale

O SUS é um questionário composto por 10 itens que mede a usabilidade geral do sistema. Avalia aspetos como a facilidade de utilização, a integração das funcionalidades e o grau de confiança que o utilizador tem ao interagir com a aplicação. O resultado do SUS fornecerá informações valiosas sobre a experiência do utilizador e possíveis áreas de melhoria.

23. I think that I would like to use this system frequently. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5
Stro	☐	☐	☐	☐	☐

Strongly agree

24. I found the system unnecessarily complex. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5
Stro	☐	☐	☐	☐	☐

Strongly agree

25. I thought the system was easy to use. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

26. I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

27. I found the various functions in this system were well integrated. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

28. I thought there was too much inconsistency in this system. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

29. I would imagine that most people would learn to use this system very quickly. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

30. *

I found the system very cumbersome to use.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

31. I felt very confident using the system. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

32. I needed to learn a lot of things before I could get going with this system. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Stro	☐	☐	☐	☐	☐	Strongly agree

Comentários Adicionais e Sugestões

Nesta área, agradecemos que deixe quaisquer comentários ou sugestões que considere relevantes para melhorar o simulador ou o processo de teste. Qualquer feedback adicional, crítica construtiva ou ideia inovadora é muito bem-vindo. O seu contributo é fundamental para o aprimoramento da ferramenta e para aprofundar a compreensão da experiência dos utilizadores.

33.

Considerações Finais e Envio

Agradecemos imensamente a sua participação neste estudo, que integra o projeto da minha dissertação. As suas respostas e impressões são essenciais para a análise e evolução do simulador de soldadura em realidade virtual.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pela Google.

Google Formulários