

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

EDUARDO CORRÊA RODRIGUES

**TWIRL: UM SISTEMA MULTIMÍDIA ENRIQUECIDO POR
VENTOS COM A TEMPERATURA CONTROLADA PARA O
APRIMORAMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE EFEITOS
TÁTEIS**

VITÓRIA
2020

EDUARDO CORRÊA RODRIGUES

**TWIRL: UM SISTEMA MULSEMÍDIA ENRIQUECIDO POR
VENTOS COM A TEMPERATURA CONTROLADA PARA O
APRIMORAMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE EFEITOS
TÁTEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Informática.

Orientador: Prof. Dr. Celso Alberto Saibel Santos
Coorientador: Dr. Estêvão Bissoli Saleme

VITÓRIA

2020

EDUARDO CORRÊA RODRIGUES

**TWIRL: UM SISTEMA MULSEMÍDIA ENRIQUECIDO POR VENTOS
COM A TEMPERATURA CONTROLADA PARA O
APRIMORAMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE EFEITOS TÁTEIS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Informática do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Informática.

Vitória-ES, 29 de dezembro de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Celso Alberto Saibel Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Joel André Ferreira dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da
Fonseca
Avaliador Externo

Prof. Dr. Artur Henrique Kronbauer
Universidade Salvador
Avaliador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho, em especial:

À minha esposa, Jessica, pelo companheirismo, paciência e apoio.

À minha mãe, por ser meu exemplo e acreditar na importância do estudo.

Ao meu irmão, pela torcida e amizade.

Ao Prof. Dr. Celso Alberto Saibel Santos, pela orientação, suporte e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Dr. Estêvão Bissoli Saleme, pela coorientação, pelos conselhos e pelas indispensáveis contribuições no trabalho e no artigo.

Ao Prof. Dr. George Ghinea e À Profa. Dra. Alexandra Covaci pelo enorme auxílio durante toda a pesquisa.

Ao André Oshiro Barcelos, pelas ajudas valiosas na elaboração dos desenhos em perspectiva.

Aos meus colegas da STI/UFES, pela compreensão e auxílio.

A todos os professores do PPGI/UFES que contribuem de forma direta para a manutenção de um ensino de qualidade.

À Universidade Federal do Espírito Santo - UFES por acreditar na qualificação profissional contínua e de qualidade.

“Creio firmemente em uma lei de compensação. As verdadeiras recompensas são sempre proporcionais ao esforço e aos sacrifícios feitos.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

Este trabalho apresenta o *Twirl*, um sistema háptico que permite a criação e entrega de fluxos de ar aquecidos e/ou resfriados sincronizados com conteúdo multimídia ou de Realidade Virtual. O *Twirl* combina a vaporização de água resfriada por pastilhas Peltier para a criação de ventos com baixa temperatura e secadores de cabelo para ventos com alta temperatura. Para avaliar o sistema, vários estudos foram realizados. Primeiramente, foi analisado o tempo que os dispositivos levam para fornecer esses efeitos, considerando as diferentes temperaturas iniciais no ambiente. Em seguida, três vídeos, um com vento quente, um com vento frio e outro com ambos, foram anotados para observar a viabilidade de se obter esses efeitos integrados ao conteúdo audiovisual. Na sequência, a variação de temperatura dos aparelhos em função da distância foi avaliada. Finalmente, um questionário foi distribuído para avaliar diferentes facetas da experiência do usuário e atitudes em relação ao *Twirl*. Os resultados, além de fornecerem recomendações práticas para a reprodução adequada desses tipos de efeitos sensoriais, também sugerem entusiasmo dos usuários por tal tecnologia.

Palavras-chaves: Temperatura, Vento, Sensação Tátil, Experiências Multissensoriais

ABSTRACT

This work presents *Twirl*, a haptic system that allows the creation and delivery of hot and cold airflow synchronised with multimedia or Virtual Reality content. *Twirl* combines the vaporisation of cooled water by Peltier elements for cold wind and hair dryers for warm wind steered by wind fans. To assess the system, several studies were carried out. First, the time taken by the devices to provide these effects was analyzed, considering the initial differences in the environment. Then, three videos, one with hot wind, one with cold wind and the other with both, were noted to observe the feasibility of obtaining these effects integrated into the audiovisual content. Then, the temperature variation of the devices as a function of the distance was validated. Finally, a questionnaire was distributed to assess different facets of the user experience and attitudes towards *Twirl*. The results, in addition to providing practical recommendations for the proper reproduction of these types of sensory effects, also suggest users' enthusiasm for such technology.

Key-words: *Temperature, Wind, Haptics, Multisensory Experiences*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de mídias tradicionais que podem ser integradas a efeitos eólicos acrescidos de estímulos térmicos. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Aciaria e https://pt.wikipedia.org/wiki/Snowboard	3
Figura 2 - Dispositivo para produzir ventos indiretos. Fonte: Matsukura et al. [21].	8
Figura 3 - O VirWind. Fonte: https://www.vrfocus.com/tag/virwind/	9
Figura 4 - Sistema desenvolvido para aumentar a imersão, através de ventos, dos pilotos em aeronaves operadas a distância. Fonte: Cardin et al. [5].	10
Figura 5 - Haptic ChairIO - 8 ventiladores e 4 atuadores de vibração no piso. Fonte: Feng et al. [22].	10
Figura 6 - O amBX Gaming PC peripherals da Philips. Fonte: Philips [2].	11
Figura 7 - O Birdly foi desenvolvido para simulação de voo livre, como um pássaro. Fonte: Rheiner et al. [3].	11
Figura 8 - Sistema VR impresso em 3D que integra estímulos térmicos, eólicos e olfativos em um HMD. Fonte: Ranasinghe et al. [26].	12
Figura 9 - O ThermoVR. Fonte: Peiris et al. [27].	13
Figura 10 - O FaceHaptics. Fonte: Wilberz et al. [28].	13
Figura 11 - O WindyWall. Fonte: Tolley et al. [31].	14
Figura 12 - Ambiente CAVE criado para fornecer vento e sensações de calor. Fonte: Hülsmann et al. [32].	15
Figura 13 - O Haptic Around: (a) o módulo de ar quente, (b) módulo de calor, (c), módulo de vento, (d) módulo de chuva e (e) módulo de névoa. Fonte: Han et al. [33].	16
Figura 14 - O Hapmosphere. Fonte: Han et al. [34].	17
Figura 15 - Dispositivo para irradiar calor durante as simulações de incêndio. Fonte: Shaw et al. [4].	17
Figura 16 - Dispositivo criado para produzir estímulos táteis (ventos) e olfativos. Fonte: Narciso et al. [35].	18
Figura 17 - O Embodied Weather. Fonte: Ke et al. [36].	19
Figura 18 - O ThermalWear: (a) à direita, a versão masculina e a feminina do protótipo; (b) à esquerda, os componentes utilizados. Fonte: Ali et al. [38].	20
Figura 19 - O ThermalBracelet é composto pelos elementos de controle, alimentação e módulos táteis. Fonte: Peiris et al. [39].	21
Figura 20 - Protótipo tátil que permite a variação da temperatura para complementar a interação com agentes inteligentes baseados em voz. Fonte: Kim et al. [42].	22
Figura 21 - Sistema desenvolvido utilizando um tubo de vórtice para produzir ventos resfriados. Fonte: Xu et al. [45].	23
Figura 22 - Sistema baseado em componentes ultrassônicos e água vaporizada para produzir ventos resfriados. Fonte: Nakajima et al. [46].	24
Figura 23 - Cenário de uso do Twirl com a possível disposição dos atuadores de vento frio e vento quente. Fonte: Elaborada pelo autor.	37
Figura 24 - O dispositivo de vento frio (esquerda) e sua estrutura montada (direita). Componentes: (1)Cooler para dissipar o calor, (2)Pastilha Peltier,	

	(3)Dissipador de calor, (4)Reservatório de água, (5)Perfil de alumínio, (6)Mini cooler, (7)Ventilador amBX. Fonte: Elaborada pelo autor.	39
Figura 25 - Dispositivo de vento quente, com o módulo de relés conectado a um Arduino Uno (esquerda) e um secador (direita). Fonte: Elaborada pelo autor.		40
Figura 26 - Diagrama elétrico. Fonte: Elaborada pelo autor.		41
Figura 27 – Visão geral do Twirl. Fonte: Elaborada pelo autor.		43
Figura 28 - O sistema Twirl. Fonte: Elaborada pelo autor.		45
Figura 29 - Sensor para monitor a temperatura. No lado esquerdo, o Raspberry Pi 3; e, no lado direito, o sensor DHT11. Fonte: Elaborada pelo autor.		48
Figura 30 - Vídeos utilizados no experimento para verificar a variação de temperatura em um sistema multissensorial digital com anotações de efeitos sensoriais congruentes às cenas. Fonte: Elaborada pelo autor.		49
Figura 31 - Anteparo de parafina posicionado em frente ao secador. Fonte: Elaborada pelo autor.		52
Figura 32 - Anteparo de parafina posicionado em tripé para medição. Fonte: Elaborada pelo autor.		52
Figura 33 - Variação da temperatura da água no reservatório em função do tempo. Fonte: Elaborada pelo autor.		56
Figura 34 - Resultado do teste do dispositivo de fluxos de ar frio em dois cenários. O gráfico exibe a temperatura dos fluxos de ar frio ao longo do tempo. Fonte: Elaborada pelo autor.		57
Figura 35 - Resultado do teste do dispositivo de fluxos de ar quente em dois cenários. O gráfico exibe a temperatura dos fluxos de ar quente ao longo do tempo. Fonte: Elaborada pelo autor.		58
Figura 36 - Comportamento da temperatura do fluxo de ar durante a exibição dos três vídeos. Marcas da anotação: W: Vento ativado, !W: Vento desativado, HW: Vento quente ativado, !HW: Vento quente desativado, M: Névoa ativada(Frio) e !M: Névoa desativada. Fonte: Elaborada pelo autor.		59
Figura 37 - Imagens térmicas exibindo a variação da temperatura em função da distância do anteparo. Os ventos aquecidos (parte superior) e os ventos resfriados (parte inferior) são projetados contra o anteparo a 15, 45, 75 e 100 cm (da esquerda para a direita). Fonte: Elaborada pelo autor.		60
Figura 38 - Pontuações para utilidade percebida para o <i>Twirl</i> (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.		62
Figura 39 - Pontuações para facilidade de uso percebida para o <i>Twirl</i> (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.		62
Figura 40 - Pontuações para intenção de usar o <i>Twirl</i> (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.		63
Figura 41 - Pontuações para prazer percebido ao usar <i>Twirl</i> (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.		63
Figura 42 - Pontuações para a imersão do <i>Twirl</i> (TPI). Fonte: Elaborada pelo autor.		63
Figura 43 - Pontuações para as utilidades do <i>Twirl</i> em algumas aplicações. Fonte: Elaborada pelo autor.		64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos Equipamentos. Fonte: Elaborada pelo autor.....	27
Tabela 2 – Lista de Componentes da Plataforma Twirl. Fonte: Elaborada pelo autor.....	44
Tabela 3 – O Questionário UEQ-S. Fonte: Schrepp et al. [55].	54
Tabela 4 - Símbolos Utilizados para Identificar os Efeitos Sensoriais que são Ativados e Desativados nos Gráficos. Fonte: Elaborada pelo autor.	55
Tabela 5 - Médias e Desvio Padrão Obtidos pelo <i>Twirl</i> para Cada Item UEQ-S. Fonte: Elaborada pelo autor.	61
Tabela 6 - Ordem de Apresentação dos Vídeos. Fonte: Elaborada pelo autor.....	69
Tabela 7 - Questionário QoE. Fonte: Elaborada pelo autor.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVS	<i>Alexa Voice Service</i> (Serviço de voz da Alexa)
CAVE	<i>Cave Automatic Virtual Environment</i> (Caverna Digital)
HMD	<i>Head-Mounted Display</i> (Display montado na cabeça)
JND	<i>just-noticeable difference</i> (Diferença minimamente perceptível)
MPEG	<i>Moving Picture Expert Group</i> (Grupo de Especialistas de Imagens em Movimento)
MRS	<i>Mulsemmedia Renderer System</i> (Sistema Renderer Mulsemmedia)
PC	<i>Personal computer</i> (computador pessoal)
QoE	<i>Quality of Experience</i> (qualidade da experiência)
RA	Realidade Aumentada
RGB	Red, green, blue (Vermelho, Verde e Azul)
RV	Realidade Virtual
SEM	<i>Sensory Effects Metadata</i> (Metadados de Efeitos Sensoriais)
SER	<i>Sensory Effects Renderer</i> (Renderizador de Efeitos Sensoriais)
SQAS	<i>Safety and Quality Assessment Systems</i> (Sistemas de Avaliação de Segurança e Qualidade)
TPI	<i>The Temple Presence Inventory</i>
UEQ	<i>User Experience Questionnaire</i> (Questionário de experiência do usuário)
USB	Universal Serial Bus (porta serial universal)
VIA	<i>Voice-based Intelligent Agent</i> (Agente Inteligente baseado em voz)
VLCJ	VideoLAN Client Java
VR-HAM	<i>Virtual Reality Hardware Acceptance Model</i> (Modelo de Aceitação de Hardware de Realidade Virtual)
XML	<i>eXtensible Markup Language</i> (Linguagem de Marcação Extensível)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização e motivação	1
1.2	Problemas relacionados	2
1.3	Objetivo e Contribuições.....	5
1.4	Metodologia.....	5
1.5	Estrutura da dissertação	6
2	EFEITOS SENSORIAIS TÁCTEIS POR MEIO DE SISTEMAS TÉRMICOS E EÓLICOS: ESTADO DA ARTE	8
2.1	Dispositivos Térmicos e Eólicos.....	8
2.2	Comparação dos Equipamentos.....	25
2.3	Experiência do Usuário com Dispositivos Térmicos e Eólicos	28
2.4	Discussões Finais do Capítulo.....	34
3	A PLATAFORMA TWIRL	37
3.1	Dispositivo de Vento Frio.....	38
3.2	Dispositivo de Vento Quente.....	40
3.3	Diagrama Elétrico.....	40
3.4	Integração e Sincronização com o Conteúdo mulsemídia	42
3.5	Componentes Eletrônicos	43
3.6	Discussões Finais do Capítulo.....	44
4	EXPERIMENTO E MÉTODOS	47
4.1	Materiais.....	47
4.1.1	Hardware	47
4.1.2	Vídeos	48
4.2	Procedimento	49
4.2.1	Teste Dispositivo de Vento Frio	50
4.2.2	Teste Dispositivo de Vento Quente.....	50
4.2.3	Variações de Temperatura em Vídeos Anotados com Efeitos Sensoriais	51
4.2.4	Teste para Análise da Resposta em Função da Distância	51
4.2.5	Pesquisa Sobre a Aceitação, a Compreensão e a Imersão dos Usuários.....	52
5	RESULTADOS	55

5.1	Análise do Dispositivo de Vento Frio.....	55
5.2	Análise do Dispositivo de Vento Quente.....	58
5.3	Fluxos de Ar Sincronizados com os Vídeos.....	58
5.4	Análise da Resposta em Função da Distância.....	60
5.5	Análise da Pesquisa Sobre Aceitação, Compreensão e Imersão dos Usuários	61
5.5.1	<i>User Experience Questionnaire (UEQ-S).....</i>	61
5.5.2	<i>Virtual Reality Hardware Acceptance Model (VR-HAM)</i>	61
5.5.3	<i>The Temple Presence Inventory (TPI)</i>	63
5.6	Discussões Finais do Capítulo.....	64
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	66
6.1	Trabalhos Futuros	67
6.1.1	Design do Experimento.....	68
6.1.2	Procedimento do Experimento.....	69
6.1.3	Questionários.....	70
6.1.4	Análise dos Resultados	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A combinação de sons, elementos gráficos e animações, que estimulam a visão e a audição dos usuários, está presente em quase todas as aplicações de plataformas de desktop e móveis atuais. No entanto, os sentidos humanos cobrem mais do que a visão e audição, e assim, é natural uma transição de um cenário multimídia para um cenário mulsemídia, no qual múltiplos meios sensoriais são utilizados para a comunicação com os usuários. O enriquecimento do conteúdo audiovisual multimídia com estímulos olfativos, táteis e termocépticos oferece novas oportunidades para tecnologias imersivas e abre horizontes para comunicação, educação, publicidade e medicina. Por outro lado, constata-se que a inclusão destes novos estímulos exige a geração de soluções tecnológicas inovadoras para os sistemas mulsemídia, envolvendo a criação de componentes de software (com os quais os usuários vão interagir) e de hardware (que irá gerar os efeitos sensoriais) que são combinados para fornecer uma variedade de efeitos de vento, vibração, odor, entre outros para os usuários [1].

Vários são os exemplos de aplicações mulsemídia. No entretenimento, os players de vídeo, aplicativos VR (*Virtual Reality* – Realidade Virtual) e AR (*Augmented Reality* – Realidade Aumentada), plataformas de jogos e cinemas empregaram o conceito de mulsemídia para aumentar o entretenimento dos usuários [2] [3]. Simulações para situações de risco em ambientes virtuais de treinamento começam a se tornar realidade [4] [5]. Além disso, na área da saúde, aplicativos multissensoriais também têm sido usados para simulação, treinamento e tratamentos [6]. Na educação, estudos indicam que a aprendizagem multissensorial pode ser mais eficaz para os alunos [7]. Na cultura, museus e exposições envolverem usuários em obras de arte multissensoriais [8]. No marketing, Petit, Velasco e Spence [9] apontaram uma infinidade de tecnologias para entregar experiências multissensoriais para os clientes nas lojas. Assim, as possibilidades e oportunidades de experiências multissensoriais são inúmeras [10].

Neste contexto, muitos pesquisadores realizaram estudos para entender como os humanos percebem esses estímulos extras integrados aos sistemas multimídia. Vários experimentos de QoE (*Quality of Experience* – Qualidade de Experiência) do usuário foram conduzidos para investigar os níveis de satisfação e aborrecimento ao consumir conteúdo mulsemídia em configurações variadas. Experimentos recentes de QoE no campo de efeitos sensoriais têm apontado ganhos significativos de satisfação do usuário quando comparado a

apresentações puramente audiovisuais [11]. Waltl, Timmerer e Hellwagner [12] também verificaram que os usuários têm uma maior percepção de qualidade quando efeitos sensoriais são sincronizados à apresentação de um vídeo do que quando o mesmo vídeo é apresentado sem a inclusão estes efeitos.

1.2 PROBLEMAS RELACIONADOS

A transição dos sistemas multimídia para mulsemídia, com a inclusão de efeitos olfativos, hápticos (ou táteis) e gustativos, tem potencial de melhorar e de criar formas inovadoras para a comunicação entre usuários e aplicações [13].

Dentre as várias possibilidades de combinação de efeitos sensoriais, os efeitos táteis envolvendo a sincronização de ventos combinados com conteúdos audiovisuais têm sido cada vez mais difundidos [14]. Mais ainda, em alguns experimentos relatados na literatura nos quais tais efeitos são utilizados, os participantes têm relatado que gostariam de poder experimentar sensações térmicas, produzidas com ventos quentes ou frios, durante as apresentações. Este foi o caso do estudo realizado por Rainer et al. [15] sobre o impacto dos efeitos de iluminação, vibração e vento na Qualidade da Experiência (*Quality of Experience – QoE*) dos usuários com vídeos. No estudo, alguns participantes relataram que a falta de controle de temperatura nos efeitos com ventos sincronizados ao conteúdo do vídeo reduziu a sensação de realismo experimentada. Recentemente, Saleme [16] relatou que cerca de 70% dos participantes gostaram de ter efeitos com vento junto à apresentação dos cinco vídeos usados em seus experimentos, mas alguns deles disseram esperar que os ventos fossem frios ou quentes dependendo da cena.

Como será discutido no Capítulo 2, a grande maioria dos estudos relatando o uso de ventos sincronizados à apresentação dos conteúdos audiovisuais não trata de variações térmicas neste tipo de efeito. Em outras palavras, os fluxos de ar são gerados a temperatura ambiente, normalmente por ventiladores acoplados à plataforma de apresentação. Além disso, quando existe algum estímulo térmico, os mecanismos para criar tais sensações não estão diretamente integrados aos dispositivos que produzem vento, o que pode reduzir a sensação de realismo em cenários de VR ou AR. Um exemplo prático neste sentido seria um subsistema capaz de gerar efeitos de (i) fluxos de ar frio na face do usuário durante sua interação com um jogo que simula um percurso de *snowboarding* ou (ii) fluxos de ar quente em um ambiente simulado de uma aciaria para treinamento industrial. A Figura 1 exibe tais

situações, em que ventos com temperatura controlada provavelmente aumentariam a sensação imersão do usuário e, conseqüentemente, elevariam a QoE experimentada.



Figura 1 – Exemplos de mídias tradicionais que podem ser integradas a efeitos eólicos acrescidos de estímulos térmicos. Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Aciaria> e <https://pt.wikipedia.org/wiki/Snowboard>

A tecnologia em questão pode ser aplicada, por exemplo, para simular situações de risco em ambientes virtuais de treinamento, sem oferecer o risco real de acidente para os usuários, tal como simulações de evacuações em caso de incêndios [4]. Ela também tem o potencial de aumentar a sensação de imersão dos usuários e de gerar alertas de situações de perigo iminente para pessoas com limitações de visão ou audição.

Diversas questões devem ser respondidas para que a produção de ventos com temperatura variável seja posta em prática em sistemas mulsemídia. Uma delas é a sincronização do conteúdo multimídia aos efeitos sensoriais que, em geral, são integrados aos conteúdos de mídia tradicionais por meio de metadados (*Sensory Effects Metadata* ou SEM), sendo processados junto com a apresentação destes conteúdos [17]. O desafio está em lidar com tempos de resposta relativamente altos para o acionamento dos ventiladores e para alteração dos valores de temperatura dos fluxos de ar gerados. Além disso, o esforço requerido para implementar a sincronização destes efeitos com o conteúdo audiovisual é elevado [18].

Outra questão é a diferença entre o valor especificado de temperatura, o sentido e o percebido pelo usuário. É importante destacar que a sensação é basicamente uma resposta de um receptor sensorial a estímulos externos, ou seja, é uma resposta fisiológica do organismo, no qual os sentidos humanos convertem a energia de um estímulo em mensagens neurais e que provoca reações. A percepção, por outro lado, é o julgamento dado pelo sujeito com base nas informações das sensações, ou seja, a interpretação por parte do indivíduo do que foi captado pelos sentidos, sendo considerado um processo que pode ser influenciado por fatores fisiológicos e psicológicos, tanto quanto por questões externas como aspectos culturais e

sociais [19]. Assim, um estímulo térmico na pele percebido por uma pessoa, pode ser entendido de forma diferente por outra pessoa, para uma mesma temperatura.

Tais questões, e várias outras, só poderão ser respondidas após a construção de um conjunto de equipamentos capazes de entregar os referidos efeitos. A física básica demonstrou que o resfriamento e o aquecimento não são processos simétricos. O aquecimento acontece em uma taxa mais rápida, além de ser mais eficiente, pois há vários processos irreversíveis que podem ser usados. No resfriamento, por outro lado, ao retirar o calor de uma fonte em temperatura mais baixa e movê-lo para uma fonte em uma temperatura mais alta, um trabalho deve ser executado a fim de diminuir a entropia do sistema. Este processo assimétrico é baseado na segunda lei da termodinâmica que afirma que “a entropia total de um sistema isolado nunca pode diminuir ao longo do tempo e é constante se, e somente se, todos os processos forem reversíveis”¹. Adicionar efeitos táteis por meio de fluxos de ar a este processo adiciona outro nível de complexidade. Assim, implementar um sistema que pode alternar entre fluxos de ar quente e frio em uma fração de tempo muito curta, e entregar esses efeitos sensoriais sincronizados com o conteúdo audiovisual é extremamente desafiador. Nesse contexto, para oferecer boas experiências ao usuário, é de suma importância investigar a taxa de atenuação dos efeitos produzidos e entender como a combinação dos efeitos de vento e temperatura varia ao longo do tempo e com a distância entre o usuário e o dispositivo gerador do efeito. Todos esses aspectos são negligenciados nos trabalhos da literatura envolvendo efeitos táteis.

A partir do exposto, esta dissertação se propõe a investigar a inserção de efeitos sensoriais táteis produzidos por ventos aquecidos ou resfriados sincronizados à apresentação de vídeos. Desta forma, este trabalho busca responder as seguintes questões de pesquisa: (i) É possível inserir efeitos táteis em um sistema mulsemídia por meio de dispositivos produtores de ventos resfriados e aquecidos, de baixo custo, de fácil reprodução e que podem ser sincronizados a vídeos? (ii) Não existe, na literatura recente, trabalhos que reportem a influência de ventos com a temperatura controlada em um sistema mulsemídia?

¹ Disponível em: <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node38.html>

1.3 OBJETIVO E CONTRIBUIÇÕES

Em linhas gerais, este trabalho de mestrado propõe a implementação de um componente de um sistema mulsemídia capaz de produzir ventos aquecidos e/ou resfriados e sincronizados com conteúdo multimídia tradicional. Estes ventos são um caso particular de efeitos táteis resultante da pressão do fluxo de ar sobre a pele humana. Esse componente, foi denominado *Twirl*, um termo em inglês associado à ideia de “girar algo rapidamente”, fazendo referência às hélices dos ventiladores.

As principais contribuições desta pesquisa estão resumidas nos seguintes pontos:

- Uma revisão do estado-da-arte sobre trabalhos relacionados para comprovar o ineditismo da solução adotada pelo *Twirl*;
- O protótipo *Twirl* e sua integração a uma plataforma mulsemídia para a adição de ventos aquecidos e resfriados a vídeos.
- Um conjunto de resultados experimentais para demonstrar:
 - i. a variação de temperatura dos ventos frios e quentes produzidos pelos dispositivos com o tempo;
 - ii. os limites para a sincronização entre esses efeitos e o conteúdo da mídia, dados os lentos tempos de resposta necessários para o acionamento dos ventiladores e para alterar os valores de temperatura dos fluxos de ar gerados;
 - iii. a variação dos efeitos proporcionados pelos ventos frios e quentes com a distância entre usuário e dispositivos.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho foi baseada em uma abordagem multimétodo que integra várias técnicas (quantitativas e qualitativas) da área de Interação Humano-Computador (IHC). Partindo de um escopo mais amplo para entender a influência de efeitos táteis térmicos sincronizados a mídias tradicionais na QoE dos usuários, esse estudo foi iniciado com uma pesquisa sobre soluções recentes para a produção de tais efeitos por meio de fluxos de ar e de variações de temperatura. Após a identificação dessas soluções, foi feita uma análise sobre quais eram os principais desafios a serem superados num cenário no

qual o usuário não irá “vestir” nenhum tipo de dispositivo que gere tais efeitos diretamente sobre a pele do usuário. Foram identificados quais componentes deveriam estar presentes em um subsistema que permitisse a entrega dos referidos efeitos, um resultado satisfatório e uma rápida prototipagem. Objetivando uma maior eficiência, as tecnologias a serem empregadas para simplificar a implementação foram adotadas.

Além de identificar quais seriam as melhores estratégias para construir um dispositivo voltado à produção de ventos com temperatura controlada, a pesquisa teve por objetivo entender quais são as melhores técnicas para medir a imersão dos usuários.

Após a etapa de pesquisa inicial, que, dentre outras questões, revelou que os produtores de ventos aquecidos e resfriados deveriam ser feitos em dispositivos distintos, os protótipos foram elaborados e implementados. Para a construção, que começou pelo produtor de ventos resfriados, os componentes necessários foram adquiridos ou produzidos. O mesmo foi feito para os produtores de ventos aquecidos. Finalmente, foram escolhidos softwares necessários à integração e sincronização de todo o sistema.

Vários testes foram elaborados e executados. Na sequência, os resultados foram analisados para inferir o nível de imersão e de qualidade da experiência possivelmente experimentado pelos usuários com o uso do protótipo.

Vale destacar que devido à pandemia COVID-19 e ao distanciamento social provocado por ela em 2020, não foi possível realizar experimentos com usuários. No entanto, além das avaliações técnicas sobre desempenho do *Twirl*, um estudo on-line para explorar os aspectos subjetivos relacionados ao sistema foi conduzido em parceria com a *University of Kent*, pela Professora Dra. Alexandra Covaci. Os experimentos com usuários para verificar uma das hipóteses desta pesquisa tiveram que ser deixados para trabalhos futuros. Todavia, todo o projeto do experimento já foi elaborado e será apresentado na Seção 6.1.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto da dissertação está organizado conforme exposto a seguir.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre os trabalhos relacionados à produção de sensações táteis e térmicas por meio de fluxos de ar em ambientes multimedial. Os trabalhos são comparados e discutidos considerando os objetivos de cada um, o tipo de efeito, o componente básico para alteração da temperatura, modo de apresentação do efeito, a reprodutibilidade, a complexidade e o nível de potência consumida. Ao final, as avaliações

das experiências dos usuários com os dispositivos térmicos e eólicos apresentados são ponderadas.

O capítulo 3 trata da arquitetura e a implementação da plataforma Twirl. São apresentadas as ferramentas e as tecnologias empregadas para o desenvolvimento da plataforma. Os softwares utilizados também são apresentados. Em seguida, o hardware, para facilitar o entendimento da estrutura, é decomposto em duas partes: a geração de fluxo de ar resfriado e a geração de fluxo de ar aquecido. As funcionalidades e comportamentos dos subsistemas que compõe o hardware são detalhados. Um diagrama elétrico do sistema é apresentado, bem como o valor da potência elétrica necessária para o funcionamento do sistema. Finalmente, os componentes para a construção do protótipo são descritos e caracterizados.

O capítulo 4 discute o design dos experimentos sobre a plataforma Twirl. São conduzidos quatro testes para verificar a usabilidade do sistema: teste de variação da temperatura dos ventos no dispositivo de ventos resfriados, teste de variação da temperatura dos ventos no dispositivo de ventos aquecidos, variações de temperatura em vídeos anotados com efeitos sensoriais, e teste para análise da resposta em função da distância. Ademais, é apresentada uma pesquisa, feita por meio de um questionário on-line, buscando avaliar a aceitação, a compreensão e a percepção de imersão da plataforma Twirl pelos usuários.

O capítulo 5 é dedicado à análise dos resultados obtidos nas avaliações da plataforma Twirl. O capítulo também traz discussões sobre os aspectos principais e as limitações que os desenvolvedores devem considerar ao criar experiências imersivas de ventos aquecidos ou resfriados.

O capítulo 6 resume as contribuições dessa pesquisa apresentando a conclusão. São discutidos também trabalhos futuros que podem adicionalmente contribuir para pesquisas no campo de efeitos sensoriais.

2 EFEITOS SENSORIAIS TÁCTEIS POR MEIO DE SISTEMAS TÉRMICOS E EÓLICOS: ESTADO DA ARTE

Esta seção apresenta uma série de trabalhos que tratam da produção de efeitos táteis para experiências individuais, por meio de fluxos de ar e de sensações térmicas perceptíveis na pele do usuário. Em geral, estes efeitos multissensoriais são integrados à apresentação de um conteúdo audiovisual por um subsistema de controle específico, que além de garantir a sincronização entre efeitos e conteúdo, também é responsável por controlar o conjunto de ventiladores e de dispositivos térmicos do sistema de apresentação.

2.1 DISPOSITIVOS TÉRMICOS E EÓLICOS

Em 2004, Moon and Kim [20] apresentaram uma proposta de criação de um efeito de vento circundante no ambiente do usuário. O sistema de geração de vento, chamado WindCube, consistia em vários pequenos ventiladores conectados a uma estrutura cúbica na qual um usuário fica inserido. Matsukura et al. [21] demonstraram preocupação com a possível perda de realismo nas cenas quando os ventiladores são visíveis para os usuários e solucionaram o problema com o direcionamento indireto dos fluxos de ar, permitindo com que os ventiladores ficassem em locais não visível pelo usuário, conforme Figura 2.

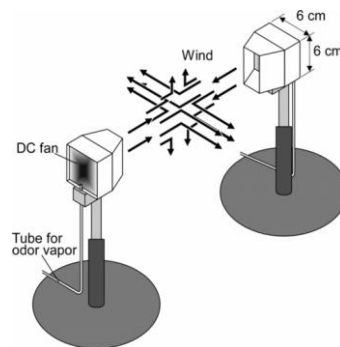


Figura 2 - Dispositivo para produzir ventos indiretos. Fonte: Matsukura et al. [21].

O VirWind², apresentado na Figura 3, é outro exemplo de plataforma destinada à produção de efeitos de vento. A plataforma é composta por quatro torres de ventiladores, que podem ser distribuídas no espaço ao redor do usuário, de forma a produzir sensações táteis por ventos em 3D. O controle das torres era feito por uma unidade controladora, que se conecta ao dispositivo gerador de conteúdo (PC ou console de games) via USB. Em 2015, uma campanha para o financiamento coletivo do VirWind por meio do Kickstarter³ foi criada, mas o projeto não obteve êxito.



Figura 3 - O VirWind. Fonte: <https://www.vrfocus.com/tag/virwind/>

Cardin et al. [5] desenvolveram um sistema composto por 8 ventiladores com controle de velocidade, distribuídos regularmente em torno de um HMD (*Head-Mounted Display*), com o objetivo de melhorar a sensação de imersão dos pilotos em aeronaves operadas a distância. O principal objetivo do usuário no ambiente simulado é o de sustentar sua aeronave o maior tempo possível, enfrentando o vento, a fim de gerar a velocidade relativa máxima. Um dos principais desafios mencionados no projeto foi o tratamento da latência do sistema devido à inércia do ventilador e à velocidade relativamente lenta do vento. A Figura 4 exhibe o protótipo.

² Disponível em: <https://www.vrfocus.com/tag/virwind/>

³ Disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/699770549/virwind-add-wind-to-your-virtual-reality-experienc>



Figura 4 - Sistema desenvolvido para aumentar a imersão, através de ventos, dos pilotos em aeronaves operadas a distância. Fonte: Cardin et al. [5].

Combinando efeitos de vibração, mediante uso de atuadores instalados no piso, e de vento, por meio de 8 ventiladores, o sistema Haptic ChairIO [22], ilustrado na Figura 5, proporciona uma sensação de realismo. O subsistema eólico consiste em um grupo de ventiladores instalados sobre uma estrutura octogonal ao redor do usuário, controlada por 2 Arduinos.

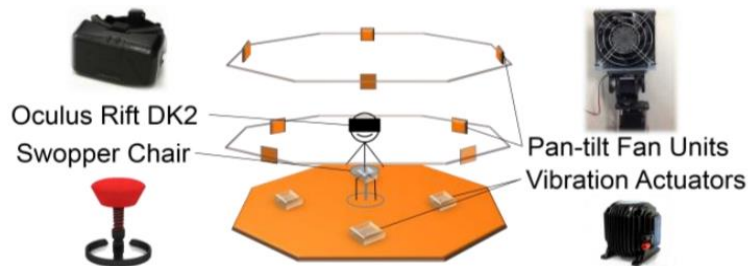


Figura 5 - Haptic ChairIO - 8 ventiladores e 4 atuadores de vibração no piso. Fonte: Feng et al. [22].

Em 2006, foi lançado o amBX Gaming PC peripherals da Philips [2], mostrado na Figura 6, a primeira plataforma comercial com geração de diferentes efeitos sensoriais (fluxos de ar produzidos por 2 ventiladores, uma barra de vibração e RGB LEDs) associados a conteúdos audiovisuais. Apesar do produto ter sido descontinuado, a amBX foi a plataforma mais utilizada nos estudos que envolveram reprodução de efeitos sensoriais até 2013 [23]. Por exemplo, Walzl et al. [24] criaram um conjunto de anotações no padrão MPEG-V para

adicionar efeitos de vento, vibração e iluminação em vídeos. Para testar tais anotações, o sistema amBX foi utilizado e, para aumentar a imersão em uma das configurações de testes, foram utilizados, de maneira conjunta, dois kits amBX. Recentemente, Saleme [16] propôs uma arquitetura desacoplada e distribuída para lidar com efeitos sensoriais e utilizou a plataforma amBX para comparar o desempenho com a arquitetura monolítica utilizada por Watl et al. [24].



Figura 6 - O amBX Gaming PC peripherals da Philips. Fonte: Philips [2].

O Birdly [3] foi desenvolvido para simular a experiência de um pássaro em voo. O usuário controla o simulador com as mãos e os braços, para se aproximar da experiência de utilizar asas. A visualização ocorre através de HMD (Oculus Rift), no qual o participante assiste uma paisagem virtual, em primeira pessoa, como se fosse um pássaro voando. Além disso, possui estímulos sonoros, olfativos e de vento. O estímulo olfativo é baseado no local de sobrevoo do pássaro e os odores produzidos podem variar desde o cheiro de uma floresta até outros específicos de um deserto. O equipamento pode ser visualizado na Figura 7.



Figura 7 - O Birdly foi desenvolvido para simulação de voo livre, como um pássaro. Fonte: Rheiner et al. [3].

Em 2016, Ranasinghe et al. [25] propuseram o Ambiotherm, um sistema de RV que integra estímulos térmicos e eólicos em um HMD. Ainda no mesmo projeto, Ranasinghe et al. [26] desenvolveram o Season Traveller (Figura 8), um sistema de RV impresso em 3D que, além dos estímulos térmicos e eólicos, possui o estímulo olfativo. Para fornecer esses recursos, o sistema utiliza um conjunto de ventiladores (vento), um conjunto de placas Peltier (térmicas) e de bombas de ar (olfativas), todos controlados por comandos enviados pelo HMD via Bluetooth. A sensação térmica é produzida por um módulo que se situa em volta do pescoço do usuário; tal módulo consiste em duas placas Peltier que são montadas com dissipadores de calor para regular a temperatura. O módulo de vento usa dois ventiladores e dois servomotores. Estes giram os ventiladores em até 45° para a esquerda ou direita em relação ao centro da face do usuário para tentar aumentar o realismo dos fluxos de ar.

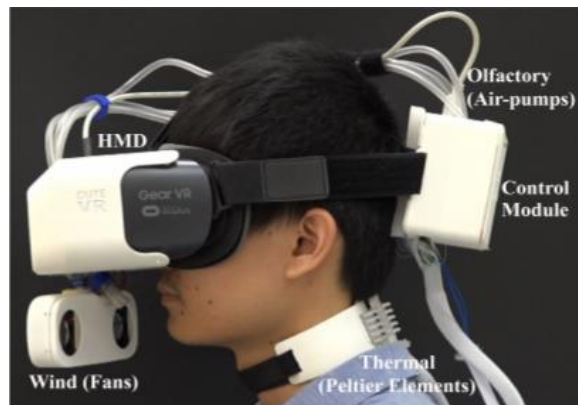


Figura 8 - Sistema VR impresso em 3D que integra estímulos térmicos, eólicos e olfativos em um HMD. Fonte: Ranasinghe et al. [26].

O ThermoVR [27] é um sistema para produzir estímulos de calor e frio diretamente no rosto do usuário com o uso de 5 módulos térmicos, baseados em pastilhas Peltier, acoplados aos óculos de RV, conforme Figura 9. Estas pastilhas são capazes de aumentar ou diminuir a temperatura a uma velocidade relativamente alta, em uma taxa de $\pm 3^{\circ}\text{C/s}$. A temperatura das pastilhas é controlada por um Arduino Nano 2 e elas ficam em contato com o rosto do usuário em 3 pontos da sua testa e nas 2 áreas abaixo de cada um dos seus olhos.

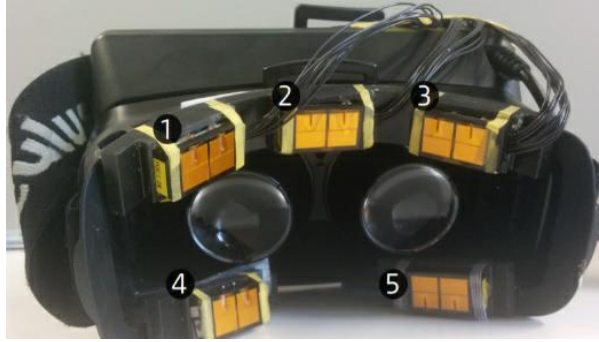


Figura 9 - O ThermoVR. Fonte: Peiris et al. [27].

O sistema FaceHaptics [28] consiste em um braço de robô personalizado conectado a um HMD (Oculus Rift). O braço permite alcançar pontos no rosto do usuário em uma faixa de $\pm 67,5^\circ$ a partir do centro. Um conjunto composto de um ventilador e uma resistência elétrica foi conectado ao HMD para permitir a produção de fluxos de ar quente. O fluxo pode atingir cerca de 55°C a 3 cm da pele do usuário. A fim de proporcionar sensações de umidade, foi adicionado um bico de spray, com acionamento por relé, ao lado do ventilador. O bico, conectado a um dispositivo Philips Sonicare Airfloss por meio de um tubo flexível, pode pulverizar pequenas quantidades de uma mistura de ar e água no rosto do usuário. O pequeno recipiente de água oferece mais de 50 sprays, com um atraso de 600 ms (causado pelo Philips Sonicare). Um Arduino Mega aciona os elementos do sistema que foi utilizado na simulação de uma cena passada em uma floresta tropical criada no 3D Unity. Na Figura 10 é possível observar o protótipo.



Figura 10 - O FaceHaptics. Fonte: Wilberz et al. [28].

Comşa et al. [29] e Covaci et al. [30] realizaram estudos de QoE em vídeos 360° com conteúdo sincronizados a estímulos olfativos e táteis por meio de fluxo de ar, produzidos a partir de dispositivos prototipados e adaptados a um HMD comercial. Um ventilador, controlado por um Arduíno, e um emissor de odor, controlado por um DFRobot Bluno Nano, foram utilizados para os efeitos. Vídeos do YouTube com diferentes graus de dinamismo e com e sem anotações de efeitos de cheiro e fluxos de ar foram assistidos pelos participantes do experimento. Os resultados mostraram que tanto a qualidade geral percebida quanto a sua satisfação dos usuários é significativamente maior quando efeitos sensoriais são utilizados nos vídeos.

Tolley et al. [31] propuseram o WindyWall (Figura 11), um painel de 90 ventiladores (coolers de computador) com 3 painéis para explorar simulações de vento com até 270°. Cada painel possui uma curvatura que cobre um ângulo de 90° e possui 30 ventiladores individuais. Os ventiladores ficam dispostos numa matriz de 5 colunas e com 6 ventiladores cada. Cada ventilador pode ser controlado individualmente para produzir diferentes efeitos do vento: sopro de ar, brisa ondulante, movimento de varredura de ar, objetos passando rapidamente pelo usuário. Os experimentos foram centrados nas diferentes configurações da matriz de 5x6 ventiladores, na qual os usuários exploravam várias simulações de vento.



Figura 11 - O WindyWall. Fonte: Tolley et al. [31].

Em 2014, Hülsmann et al. [32] apresentaram um sistema, exibido na Figura 12, para gerar ventos e irradiar calor em uma Caverna digital ou CAVE (Cave Automatic Virtual Environment). Após estabelecer os requisitos e discutirem possíveis dispositivos de hardware para produzir os estímulos, os autores chegaram a uma configuração da CAVE com uma lâmpada infravermelha de 250 W e intensidade máxima de 100°C e um ventilador axial de

24,2 W, vazão de 12,7 m³/min e diâmetro 25,4 cm. Apesar dos participantes terem relatado um enriquecimento em suas experiências na CAVE, deve-se notar que o fluxo de ar e o calor (transferido através de irradiação térmica) foram gerados a partir de dispositivos diferentes. Este fato pode ter influenciado na percepção dos usuários de ambos os efeitos, conforme mencionado pelos autores, que também enfatizaram a necessidade de se estudar com maior profundidade a modalidade cruzada de influências entre vento e calor no ambiente virtual.

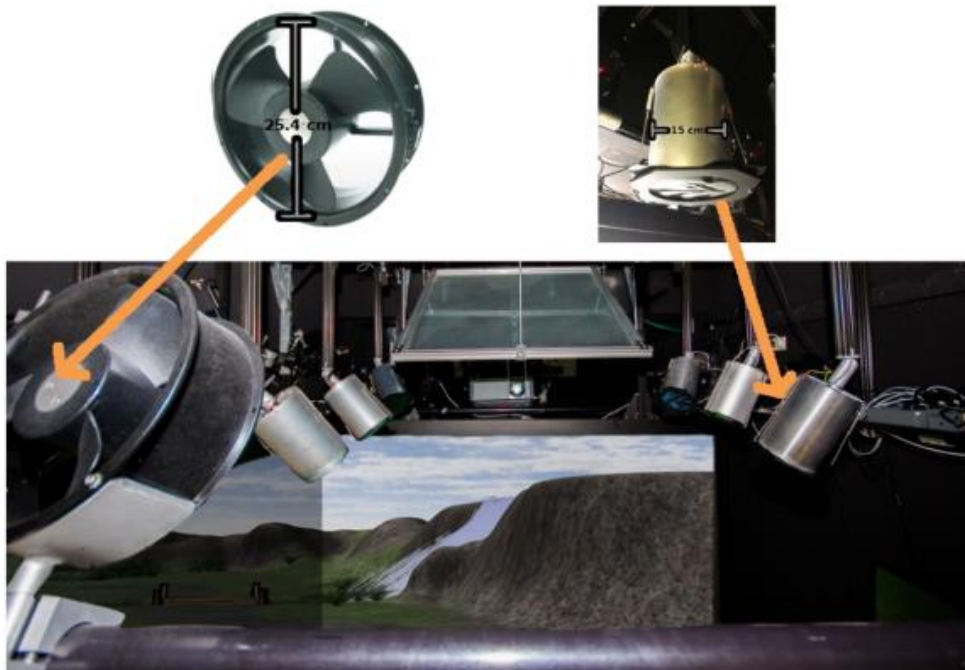


Figura 12 - Ambiente CAVE criado para fornecer vento e sensações de calor. Fonte: Hülsmann et al. [32].

O Haptic Around [33] é um sistema de estímulos táteis integrado a um HMD (Figura 13). Ele utiliza um ventilador, um soprador térmico, um dispersor de névoa e uma lâmpada para aquecimento. O sistema foi construído em um ambiente de 2m x 2m, dividido em duas partes, sendo uma para produzir a sensação de calor e a outra, de frio. A parte quente consiste em dois módulos: o de calor e o de ar quente. O módulo de calor é equipado com uma lâmpada de 250W que pode aumentar a temperatura em 3°C. Já o módulo de ar quente utiliza um soprador térmico de 1300W, que não só proporciona um fluxo de ar, mas também pode aumentar a temperatura em até 16°C. A parte fria consiste em três módulos: o de névoa, o de vento e o de chuva. O primeiro utiliza quatro transdutores ultrassônicos e uma ventoinha. O módulo de chuva é similar ao módulo de névoa, mas utiliza três atomizadores com micro

aberturas na parte inferior do reservatório de 600ml que pulveriza diretamente a água. Por fim, o módulo de vento é equipado com um ventilador que fornece ventos com velocidade de até 11,5m/s.

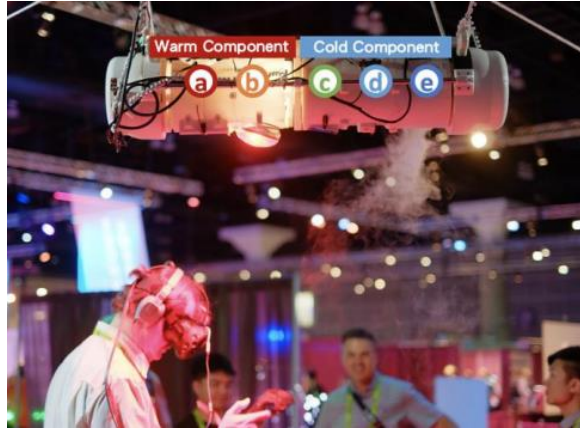


Figura 13 - O Haptic Around: (a) o módulo de ar quente, (b) módulo de calor, (c), módulo de vento, (d) módulo de chuva e (e) módulo de névoa. Fonte: Han et al. [33].

O Hapmosphere [34] é um sistema para tentar simular as condições climáticas do meio ambiente, permitindo fornecer vento, vento quente, umidade e calor, simultaneamente. O sistema (Figura 14) consiste em uma estrutura dirigível com módulos de atuadores posicionados no teto, de modo que os usuários possam caminhar livremente pelo espaço da sala utilizando um HMD. O módulo de calor é equipado com uma lâmpada (175 W) que permite aumentar a temperatura do ar de 22°C a 25°C. O de vento quente usa um soprador térmico (1300 W) e permite elevar a temperatura a 38°C. O módulo de vento é composto por um ventilador de grandes dimensões, enquanto que o de umidade usa um conjunto de ultrassom com tanque de água para produzir névoa e um bico de pulverização com uma bomba d'água para produzir chuva. Um pequeno ventilador permite direcionar o fluxo da névoa. A combinação dos módulos permitiu a geração de 7 tipos de climas: Praia, Montanha nevada, Caverna, Floresta tropical, Deserto, Floresta e Deserto temperado.

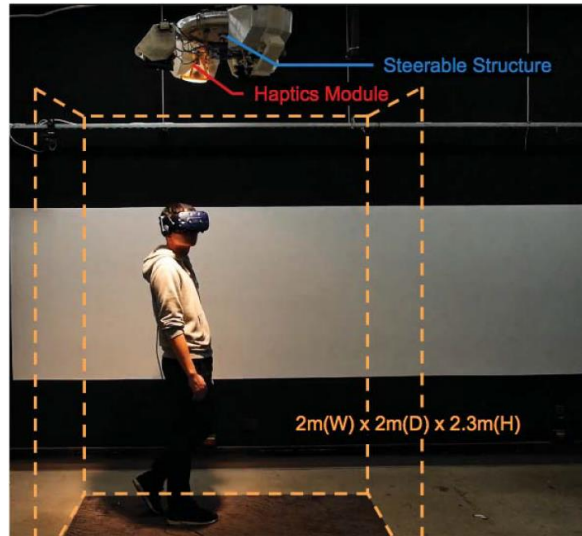


Figura 14 - O Hapmosphere. Fonte: Han et al. [34]

Diferentemente da maior parte dos trabalhos já citados, voltados ao entretenimento, Shaw et al. [4] estudaram o comportamento dos usuários na evacuação de incêndios simulados e a sensação de realismo, com a adição de calor e cheiro no ambiente simulado. O controle dos dispositivos responsáveis pelos efeitos é feito por um Arduino, com a produção de aroma realizado por um SensoryScent 200 e a irradiação de calor, por 3 dispositivos infravermelhos de potência 2KW cada. O sistema conta ainda com aletas, acionadas por servomotores, para permitir um melhor controle da propagação de calor, conforme Figura 15.

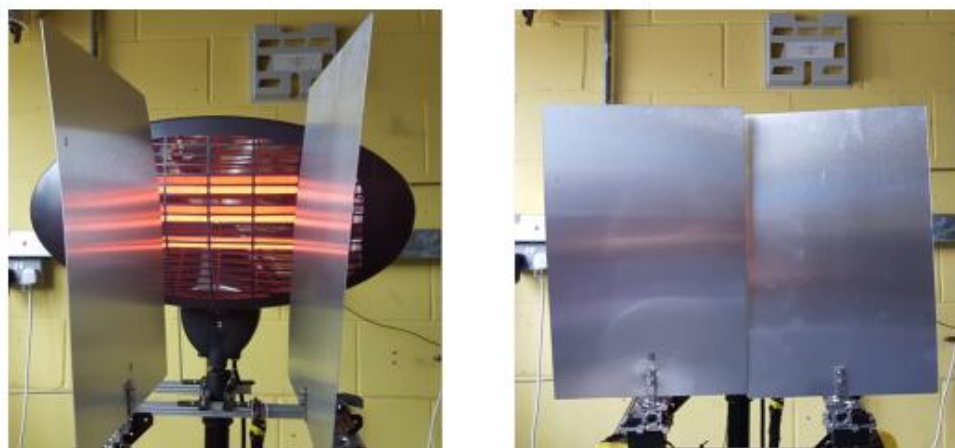


Figura 15 - Dispositivo para irradiar calor durante as simulações de incêndio. Fonte: Shaw et al. [4]

O trabalho de Narciso et al. [35] estudou o efeito de estímulos táteis e olfativos na sensação de imersão dos participantes enquanto assistiam a um vídeo em 360° utilizando um HMD. Além disso, também avaliou a influência destes estímulos no desconforto (cybersickness) do usuário ao interagir com ambientes de RV. Para efeitos olfativos, foi utilizado um sistema de aroma SensoryCo SmX-4D, alimentado por ar comprimido e um cheiro é pré-carregado, que é liberado no ambiente usando o bico proprietário da SensoryCo. No vídeo 360°, os participantes interagiram com um estande de vendas de manjerição e, para garantir a ausência de outros odores, foi utilizado um sistema para reciclar constantemente o ar da sala do experimento. Os efeitos táteis foram implementados por meio de um fluxo de ar fornecido por uma mangueira com ar comprimido (Figura 16), proporcionando aos participantes uma sensação de vento distribuída uniformemente.



Figura 16 - Dispositivo criado para produzir estímulos táteis (ventos) e olfativos. Fonte: Narciso et al. [35].

O Embodied Weather [36], mostrado na Figura 17, busca fornecer ao usuário uma experiência que envolve diferentes efeitos climáticos (nublado, garoa, chuva e tempestade). O trabalho visa conscientizar o público sobre o impacto causado pelas atividades antropogênicas no planeta, que ocasiona condições climáticas extremas, como tufões, inundações, ondas de calor e de frio. O experimento relatado pelos autores simula a experiência do usuário estar em um tufão na cidade de Hong Kong. O subsistema que produz os efeitos de vento é composto por um Arduino Mega com um módulo relé, para o controle dos componentes, um ventilador de grande potência e velocidade variável e óculos de RV, para apresentar o vídeo que simula o tufão.



Figura 17 - O Embodied Weather. Fonte: Ke et al. [36].

Wettach et al. [37] investigaram o uso das sensações térmicas para gerar notificações para o usuário em aplicações móveis. Dois protótipos foram desenvolvidos para avaliar a proposta. O primeiro, destinado a testar a capacidade de detecção do calor nas pontas dos dedos, usou um resistor como fonte de calor. Este protótipo recebia a informação de notificação e convertia em até três níveis de aquecimento (32°C, 37°C e 42°C). Já o segundo protótipo também fez uso de um resistor e foi utilizado para um cenário de navegação espacial, no qual a temperatura é elevada gradualmente de acordo com a proximidade entre o usuário e seu destino. Testes com uma pastilha Peltier, para gerar calor e frio, revelaram um excessivo consumo de energia. Além disso, os usuários relataram certo desconforto com as sensações de frio geradas. A capacidade dos usuários reconhecerem os níveis corretos de temperatura (baixa, média ou alta) foi testada a partir do toque de um dedo na superfície do protótipo.

O ThermalWear [38] é uma espécie de colete térmico desenvolvido para explorar a relação entre estímulos térmicos e a percepção de mensagens de voz com afeto (Figura 18). Foram criados dois protótipos (uma versão masculina e uma feminina), que tiveram como base um colete de mergulho em Neoprene, no qual foi inserido uma pastilha Peltier, escolhida, segundo os autores, por sua capacidade de fornecer mudanças rápidas de temperatura. Além dela, foi utilizado um ESP8266, um regulador de tensão, um termopar tipo K, um MAX31850 para conversão digital, um driver de motor de corrente contínua (BTN8982TA) e um dissipador de calor. O termopar foi utilizado para medir a temperatura

em tempo real (intervalos de 100ms). O driver de motor de corrente contínua foi adicionado ao projeto para permitir a alteração do valor da tensão na pastilha de Peltier, admitindo, assim, diferentes estímulos térmicos.

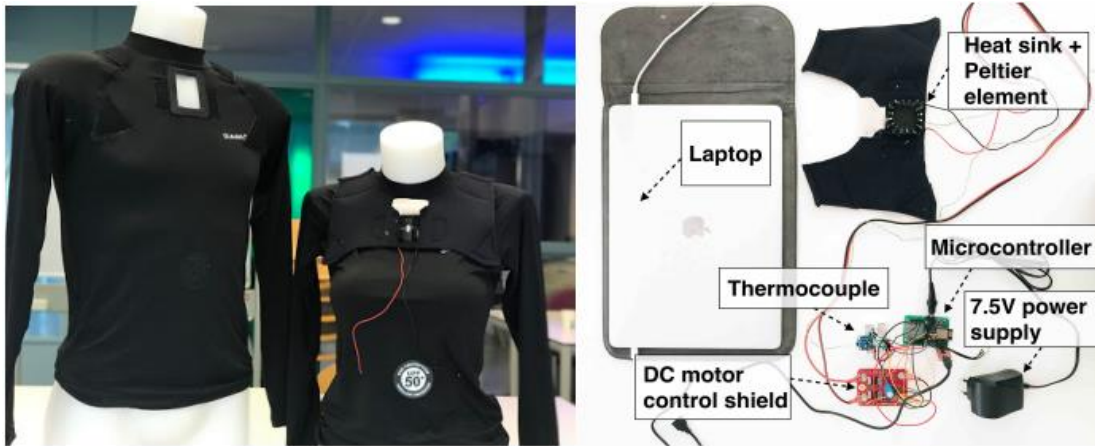


Figura 18 - O ThermalWear: (a) à direita, a versão masculina e a feminina do protótipo; (b) à esquerda, os componentes utilizados. Fonte: Ali et al. [38].

O ThermalBracelet [39] é um protótipo de bracelete, conforme Figura 19, montado ao redor do pulso do usuário, para produzir estímulos de vibração e aquecimento/resfriamento. Os autores também utilizaram pastilhas Peltier e justificaram sua escolha pela capacidade de promover mudanças rápidas de temperatura e fornecer estímulos de aquecimento ou resfriamento. Para o desenvolvimento do bracelete, vários módulos táteis [40] foram utilizados para produzir uma resposta vibratória e térmica sobre a pele. Eles são compostos por um vibrador miniaturizado (Force Reactor AF) e 4 pastilhas Peltier, sendo 2 em diagonal, para aquecimento, e 2 outras, para resfriamento. Todos os módulos foram controlados por um microcontrolador Arduino Mega. Um laptop se conecta (i) ao controlador Arduino Mega do protótipo por meio de uma conexão de porta serial para emitir comandos de aquecer/resfriar e (ii) ao driver de controle da vibração através de sua interface de áudio.

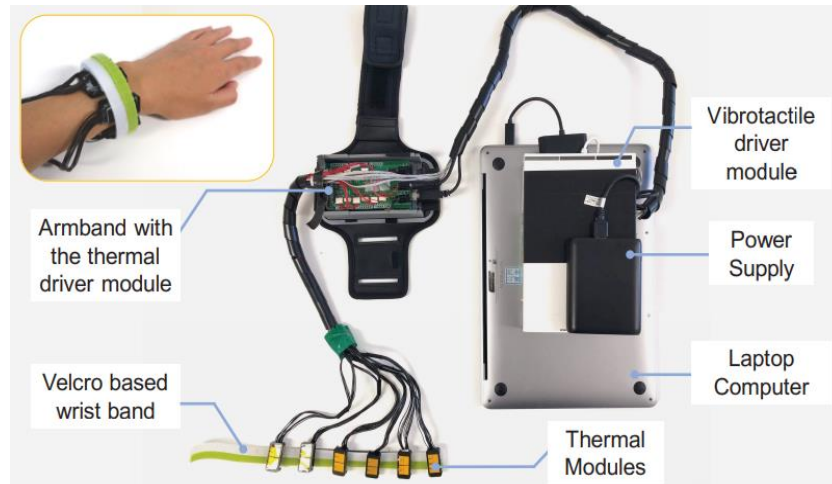


Figura 19 - O ThermalBracelet é composto pelos elementos de controle, alimentação e módulos táteis. Fonte: Peiris et al. [39].

Semelhante ao protótipo anterior, Soucy et al. [41] apresentaram o THED, um *display* térmico vestível para perceber sensações térmicas em um ambiente de realidade virtual (VR). O equipamento consiste em um módulo de estimulação térmica (pastilha Peltier e dissipador térmico) usado no pulso e um módulo de controle que utiliza comunicação Bluetooth (Bluno, Arduino e BLE). O protótipo foi testado em um ambiente de RV que apresenta para o usuário uma fogueira em um clima de neve. O principal objetivo do estudo foi identificar como os humanos percebem as sensações térmicas em suas mãos.

Kim et al. [42] propuseram um protótipo háptico que permite a variação da temperatura para complementar a interação com agentes inteligentes baseados em voz (VIA, Voice-based Intelligent Agent), como, por exemplo, Alexa, Siri e Bixby. O protótipo foi dividido em duas partes principais: a configuração da VIA e o desenvolvimento da estimulação térmica. A primeira foi implementada usando o Alexa Voice Service (AVS) da Amazon em um Raspberry Pi. Na segunda parte, mostrada na Figura 20, foram instalados dois estimuladores térmicos nas extremidades do protótipo. Os estimuladores foram configurados para cinco níveis de sensação térmica (mais frio, frio, neutro, quente, e mais quente) para interação com as mãos dos usuários. Um fio de aquecimento infravermelho gera calor e uma pastilha Peltier, acoplado a um dissipador de calor e a um cooler, retira calor do protótipo. O uso combinado do fio de aquecimento e da Peltier permitiram mudanças de temperatura eficazes. Por fim, dois sensores de temperatura infravermelho foram instalados nos estimuladores para medir a temperatura em tempo real.



Figura 20 - Protótipo tátil que permite a variação da temperatura para complementar a interação com agentes inteligentes baseados em voz. Fonte: Kim et al. [42].

Wilson et al. [43] apresentaram dois estudos sobre o limite da percepção dos usuários em estímulos térmicos induzidos nas pontas dos dedos, palma da mão, superfície dorsal do antebraço e superfície dorsal do braço. Os estudos foram realizados com um microcontrolador e duas pastilhas Peltier para produzir a sensação térmica. Os resultados mostraram que: (i) a palma da mão é mais sensível, (ii) a sensação de frio é mais perceptível e confortável do que a sensação de calor e que (iii) os estímulos com mudanças mais bruscas são mais detectáveis, porém menos confortáveis.

O ThermalBitDisplay [44] é um dispositivo háptico composto por pastilhas Peltier que objetiva implementar diferentes sensações térmicas na pele do usuário. Os autores decidiram usar a menor pastilha Peltier disponível para que fosse possível incorporá-la em dispositivos portáteis, como um anel ou uma pulseira, além de reduzir o consumo de energia.

Xu et al. [45] implementaram um protótipo que controla a velocidade do fluxo do ar gerado para produzir um resfriamento pela remoção do calor da pele humana. Para gerar o ar frio, o protótipo utiliza um tubo de vórtice (Figura 21), que é um dispositivo pequeno e simples e não possui partes móveis. O autor argumenta que, em comparação com a pastilha de Peltier, que precisa de muito mais tempo para atingir a temperatura desejada, o tubo de vórtice proporciona respostas mais rápidas para o resfriamento quando alimentado com ar comprimido, além de poder alcançar temperaturas muito baixas (em torno de -20°C). O protótipo é composto por um tubo de vórtice, um compressor (750W) para fornecer ar comprimido e uma válvula solenoide para controlar a velocidade do fluxo do ar frio gerado.

Os resultados mostraram que quanto mais rápido o fluxo de ar, maior a sensação de frio relatada pelos usuários.

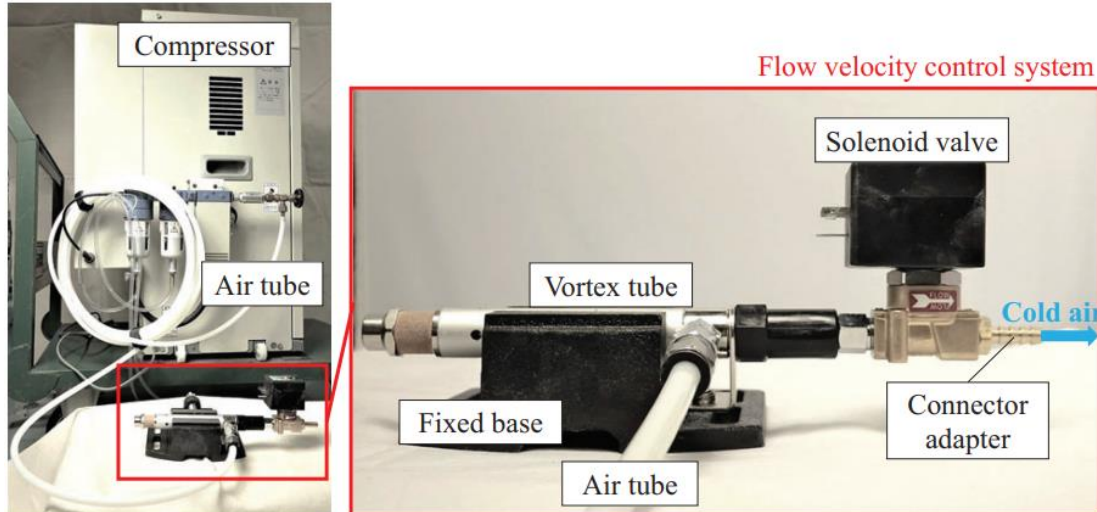


Figura 21 - Sistema desenvolvido utilizando um tubo de vórtice para produzir ventos resfriados. Fonte: Xu et al. [45].

Nakajima et al. [46] apresentam um sistema que aprimora o efeito do resfriamento obtido através da geração de fluxo de ar misturado à água vaporizada (névoa) por meio de transdutores ultrassônicos. Tal sistema (Figura 22) é composto por uma superfície de componentes ultrassônicos em fase; por transdutores ultrassônicos, para gerar névoa; e por um tanque de polietileno, para armazenar a névoa. O tanque é conectado a um ventilador e a um duto e, no momento em que o ventilador é acionado, o ar é soprado para dentro do tanque e a névoa é descarregada. A saída do duto é configurada de modo que fique alinhada com a superfície de componentes ultrassônicos. Uma parte da névoa descarregada do duto é transportada pelo fluxo de ar gerado a partir de tal superfície, aprimorando, assim, o efeito do resfriamento.

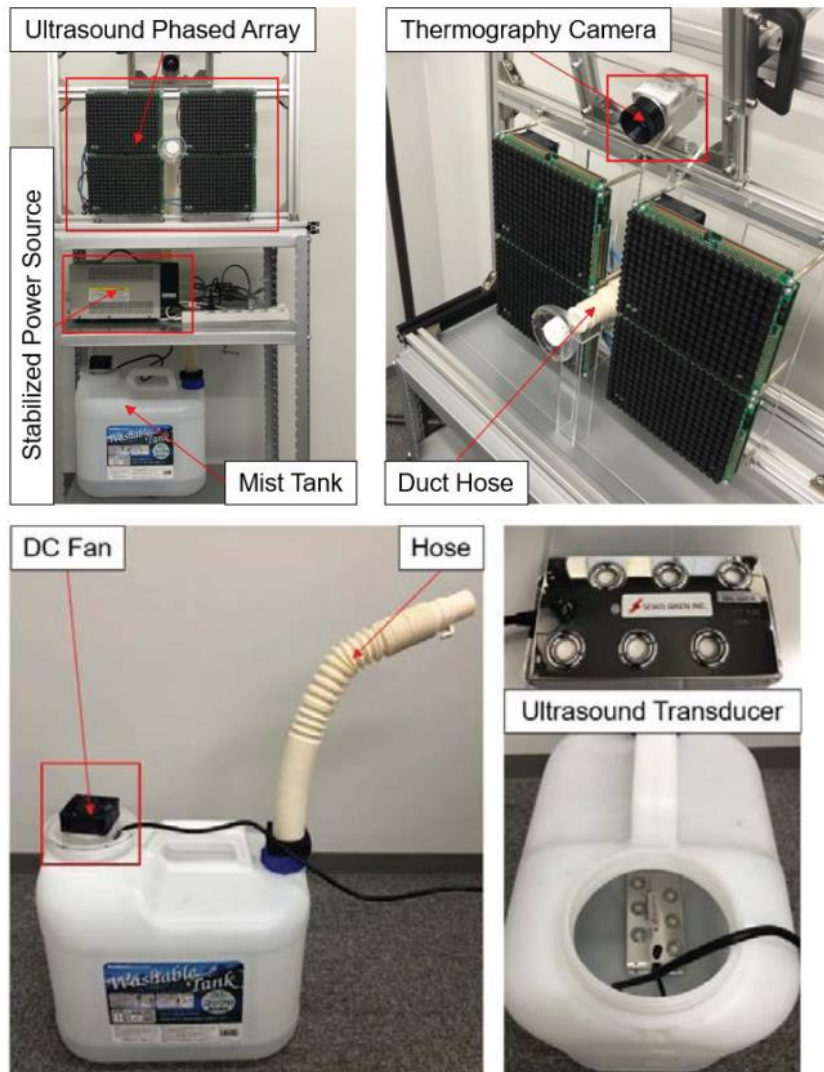


Figura 22 - Sistema baseado em componentes ultrassônicos e água vaporizada para produzir ventos resfriados. Fonte: Nakajima et al. [46].

Brooks et al. [47] criaram um equipamento eletrônico de baixa potência que gera uma ilusão de variação de temperatura. Tal ilusão depende das propriedades de certos aromas, como o frescor da hortelã ou o odor dos pimentões. Esses odores estimulam não apenas a parte olfativa, mas também o nervo trigêmeo do nariz, que possui receptores que respondem à temperatura. Para explorar isso, os autores projetaram um dispositivo vestível baseado em uma microbomba (que produz pequenas rajadas de 70ms) e um atomizador (vibrating mesh) que emite até três aromas "térmicos" personalizados diretamente no nariz do usuário. Ao respirar esses aromas, o usuário sente calor ou frio. O controle do dispositivo é todo feito por bluetooth. A abordagem chega a ser de 20 a 52 vezes mais eficiente do que equipamentos térmicos convencionais relatados em trabalhos anteriores. No entanto, diferentemente de

pastilhas Peltiers, lâmpadas de calor ou aparelhos de ar condicionado, o dispositivo tem operação limitada devido à necessidade de reabastecer o reservatório do atomizador.

2.2 COMPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Nesta Seção, serão sintetizadas e comparadas as principais características das soluções apresentadas no decorrer deste capítulo. Na Tabela 1, a coluna “Comercial” informa se o dispositivo é vendido ou se é um protótipo. A terceira coluna, a de “Produção do Efeito”, visa informar os tipos de efeitos sensoriais que os equipamentos podem fornecer para os usuários. Na sequência, a coluna “Componente básico para alteração da temperatura” esclarece quais são os componentes eletrônicos que produzem os efeitos térmicos mencionados na coluna anterior. O campo “Modo de apresentação do efeito” explica se o dispositivo é vestível ou se permanece disposto em algum local no ambiente. As duas colunas seguintes fornecem a informação sobre a “Possibilidade de reproduzir o *device*” e, se for possível, a dificuldade para tal, baseado na complexidade da construção. Por fim, o “Nível de Potência consumida” corresponde a faixa de potência de cada dispositivo para produzir os efeitos eólicos e térmicos. Neste caso, a informação “Baixo” representa uma faixa de até 50W. Para os itens marcados com “Médio”, a potência consumida está na faixa que varia entre 50W e 1KW. O “Alto” foi utilizado para equipamentos que operam acima de 1KW. A escala de potência foi dividida em três para englobar os seguintes segmentos: portátil, doméstico e industrial.

É importante perceber que a maioria dos dispositivos entregam os ventos em temperatura ambiente. Além disso, dos poucos que fornecem fluxo de ar com alteração na temperatura, a maioria realiza aquecimento e utiliza pastilhas Peltier. Os dispositivos de maior consumo energético utilizam, em geral, lâmpadas de aquecimento ou sopradores térmicos. Finalmente, os dispositivos vestíveis (*wearables*) tendem a consumir menos potência, porém possuem uma maior complexidade para implementação.

Ref.	Nome ou Descrição	Comercial	Produção do Efeito	Componente básico para alteração da temperatura	Modo de apresentação do efeito	Possibilidade de reproduzir o device	Dificuldade de implementação	Nível de Potência consumida
-	VirWind⁴	Sim	Vento Ambiente	-	No ambiente	Não	-	Médio
[2]	amBX Gaming PC peripherals da Philips	Sim	Vento Ambiente	-	No ambiente	Não	-	Médio
[3]	Birdly	Sim	Vento Ambiente	-	Wearable + HMD	Não	-	Médio
[26]	Season Traveller	Não	Vento Ambiente e aquecimento por contato	Pastilha Peltier	Wearable + HMD	Sim	Muito alto	Médio
[28]	FaceHaptics	Não	Vento Ambiente, Vento Aquecido e Umidificado	Resistor / Philips Sonicare Airfloss	Wearable + HMD	Sim	Muito alto	Médio
[5]	Sistema para aumentar a imersão dos pilotos em aeronaves operadas a distância	Não	Vento Ambiente	-	Wearable + HMD	Sim	Médio	Baixo
[32]	Ambiente CAVE	Não	Vento Ambiente	Lâmpada infravermelho 250 W	No ambiente	Sim	Baixo	Médio
[34]	Hapmosphere	Não	Vento Ambiente, Vento Aquecido e Umidificado	Soprador térmico 1,3KW / transdutores ultrassônicos	No ambiente com HMD	Sim	Muito alto	Alto
[35]	Dispositivo para produzir estímulos táteis (ventos) e olfativos	Não	Vento Ambiente	-	No ambiente com HMD	Sim	Baixo	Baixo
[33]	Haptic Around	Não	Vento Ambiente, Vento Aquecido e Umidificado	Soprador térmico 1,3KW / transdutores ultrassônicos	No ambiente com HMD	Sim	Alto	Alto
[21]	Dispositivo para ventos indiretos	Não	Vento Ambiente	-	No ambiente	Sim	Baixo	Baixo
[22]	Haptic ChairIO	Não	Vento Ambiente	-	No ambiente com HMD	Sim	Médio	Baixo

⁴ Apesar de não ter sido reportada em um estudo artigo científico, a solução para desenvolvida no sistema VirWind pode ser encontrada a partir da URL:

<https://www.vrfocus.com/tag/virwind/>

[31]	WindyWall	Não	Vento Ambiente	-	No ambiente	Sim	Médio	Baixo
[20]	WindCube	Não	Vento Ambiente	-	No ambiente	Sim	Alto	Baixo
[36]	Embodied Weather	Não	Vento Ambiente e vento Umidificado	Humidificador	No ambiente com HMD	Sim	Baixo	Médio
[45]	Dispositivo eólico com resfriamento através de fluxo do ar	Não	Vento Resfriados	Tubo de vórtice	No ambiente	Sim	Alto	Alto
[46]	Dispositivo eólico com resfriamento através de componentes ultrassônicos	Não	Vento Umidificado	Transdutores ultrassônicos	No ambiente	Sim	Médio	Médio
[27]	ThermoVR	Não	Aquecimento por Contato	Pastilha Peltier	Wearable + HMD	Sim	Alto	Médio
[4]	Dispositivo para irradiar calor durante as simulações de incêndio	Não	Aquecimento por Contato	Três dispositivos infravermelhos 2KW	No ambiente com HMD	Sim	Alto	Alto
[37]	Protótipo para testar a capacidade de detecção do calor nas pontas dos dedos e realizar notificações em aplicações móveis	Não	Aquecimento por Contato	Resistor	Interação por contato	Sim	Baixo	Baixo
[38]	ThermalWear	Não	Aquecimento por Contato	Pastilha Peltier	Wearable	Sim	Alto	Médio
[39]	ThermalBracelet	Não	Aquecimento por Contato	Pastilha Peltier	Wearable	Sim	Alto	Médio
[42]	Protótipo tátil térmico para interação com agentes inteligentes baseados em voz	Não	Aquecimento por Contato	Pastilha Peltier	Interação por contato	Sim	Alto	Médio
[41]	THED	Não	Aquecimento por Contato	Pastilha Peltier	Wearable	Sim	Médio	Médio
[47]	Protótipo que gera a ilusão de variação de temperatura por odor	Não	Ilusão da variação da temperatura por odor	-	Wearable	Sim	Alto	Baixo

Tabela 1 - Comparação dos Equipamentos. Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 EXPERIÊNCIA DO USUÁRIO COM DISPOSITIVOS TÉRMICOS E EÓLICOS

Rainer et al. [15] realizaram um estudo em 2012 sobre o impacto dos efeitos sensoriais (luz, vibração e vento) na qualidade da experiência em vídeos na web. O estudo teve como objetivo avaliar as qualidades subjetivas (SQAS – *Safety & Quality Assessment for Sustainability*) a fim de investigar a variação da QoE e compreender como as emoções dos usuários são influenciadas por vídeos com e sem efeitos sensoriais. Os resultados mostraram que, em geral, efeitos sensoriais melhoram a QoE em 19% em comparação aos vídeos tradicionais. Quanto ao vento, todos os participantes relataram que gostariam de adicionar efeitos térmicos à sua experiência. Alguns deles afirmaram que o efeito do vento causou uma sensação falsa porque esperavam uma mudança na temperatura sincronizada com o conteúdo do vídeo. Resultados positivos também foram relatados por Chambel et al. [48], no qual os autores do *Windy Sight Surfers* investigaram o impacto da simulação do vento no sentimento de imersão. Seus resultados mostraram um aumento da sensação de imersão como resultado da estimulação com dois ventiladores enquanto assistiam vídeos em 360°.

Em um estudo piloto, Tolley et al. [31] avaliaram de que maneira a magnitude do fluxo de ar afeta a experiência psicofísica dos usuários. Os experimentos foram centrados em diferentes configurações da parede de 30 ventiladores (denominada *WindyWall*), na qual os usuários exploravam várias simulações de vento. Os resultados revelaram que a variação individual na avaliação dos efeitos do vento é muito alta. Ventos horizontais pareciam ser mais facilmente percebidos, no entanto, a sensibilidade dos usuários a mudanças na magnitude do fluxo de ar eram altamente variáveis. É possível observar que, neste estudo, o vento foi o único conteúdo fornecido e os experimentos não analisaram o que acontece quando os efeitos do vento são sincronizados com o conteúdo audiovisual. Isso leva a inferência de que o vento é percebido de maneira diferente e a modalidade cruzada desempenha um papel nas experiências digitais enriquecidas com o vento. O trabalho de Ranasinghe et al. [26] relatou a percepção dos usuários sobre o conteúdo multissensorial usando o dispositivo personalizado que eles propuseram (*Season Traveler* - um HMD modificado para fornecer também efeitos olfativos, térmicos e eólicos). Foi descoberto que os participantes sempre podiam detectar os estímulos do vento, mas não podiam fazer o mesmo nos efeitos térmicos. Os pesquisadores levantaram a hipótese de que isso está relacionado à sensibilidade exclusiva dos participantes, ou seja, cada um percebe os efeitos térmicos de

maneira diferente. Embora essa afirmação possa ser verdadeira, ela não se aplica aos efeitos do vento, o que deixa clara a necessidade de mais estudos com os efeitos de vento e térmicos para entender a percepção dos usuários. Hülsmann et al. [32], avaliaram seu sistema CAVE aprimorado com vento e calor com um estudo piloto focado na experiência dos usuários. Seus experimentos mostraram que a experiência do usuário é enriquecida, porém uma limitação do estudo foi o número reduzido de participantes. É importante notar que o vento e o calor foram fornecidos a partir de diferentes dispositivos e isso pode ter interferido na percepção dos usuários em ambos os efeitos. Os autores enfatizaram no seu trabalho a necessidade de aprofundar o estudo sobre a modalidade cruzada de influências entre vento e calor. Os autores de [27] investigaram o efeito do conteúdo térmico - fornecido pelo ThermoVR (HMD com 5 módulos Peltier anexados a ele) - direcionado para o rosto dos usuários. Suas experiências indicaram que os estímulos frios são percebidos melhor do que os quentes; além disso, os usuários se sentem mais imersos ao experimentar a configuração máxima - todos os módulos são ativados com temperaturas quentes e frias. Por razões de segurança dos usuários, a temperatura foi mantida dentro intervalo 24°C a 40°C. A sensibilidade dos usuários a diferentes intensidades de temperaturas produzidas em uma configuração digital também foi analisada por Han et al. [34], na qual os autores simularam diferentes condições climáticas em um espaço confinado para participantes que usavam um HMD. Os resultados demonstraram que, mesmo para pequenas variações de temperatura (redução de 2° C ou aumento de 1° C), os usuários perceberam a mudança mesmo que ela não correspondesse à expectativa de temperatura no ambiente. Isso mostra a importância do conteúdo audiovisual na experiência multissensorial - os usuários podem ser levados a algumas sensações de frio e calor ao assistir vídeos de neve ou deserto. No entanto, apesar do potencial dessas soluções, os autores destacaram que o desenvolvimento de sistemas térmicos para reproduzir, por exemplo, condições climáticas extremas, é bastante desafiador. De fato, quando a temperatura varia rapidamente em tais experiências multimídia, de acordo com o conteúdo do vídeo, os efeitos térmicos devem ser fornecidos a partir de diferentes dispositivos, de maneira que o vento não os dissipe.

No trabalho de Shaw et al. [4], os participantes foram expostos a uma simulação de incêndio em ambiente virtual. O objetivo era investigar a adição de calor e cheiro à simulação de um incêndio em um edifício de escritórios. Os participantes foram separados em dois grupos: os que participaram apenas com conteúdo tradicional, ou seja, de áudio e vídeo (AV) e o grupo que participou com conteúdo multissensorial (MS). A principal diferença constatada

foi que os usuários do grupo MS se comportaram como se realmente estivessem em um incêndio. Já os participantes AV, por estarem menos imersos, se comportavam como se estivessem em uma simulação, estando mais tranquilos e com a mente mais distanciada. Os resultados mostraram que é possível aumentar a imersão do usuário em um ambiente virtual de simulação de cenário perigoso com o uso de interfaces multissensoriais.

Wettach et al. [37] apresentaram protótipos para dispositivos móveis que transmitem informações por meio de alteração térmica com base no efeito termoelétrico. A fim de avaliar a experiência e a viabilidade dos protótipos, uma série de testes com usuários foram realizados. Em todos eles, a capacidade de reconhecimento da alteração térmica foi avaliada. No primeiro teste, o usuário, ao colocar o dedo no protótipo, tentou dizer o nível correto da temperatura (baixa, média ou alta). Dos dez participantes testados, durante dez ciclos cada, houve uma média de 2,7 erros no total. Ao se retirar a taxa de erro produzida na configuração do teste, a taxa de erro final encontra-se em 25%. Nos testes prolongados, cuja duração foi de dez dias, foram examinadas as probabilidades de um efeito de aprendizagem de reconhecimento da alteração térmica. Nesse teste, o participante utilizou um pequeno dispositivo com uma área de toque que se aquecia, de forma aleatória, em cinco níveis de temperatura diferentes. Em seguida, era solicitada a informação sobre qual o nível de temperatura que o protótipo se encontrava. Descobriu-se que a taxa de erro, que inicialmente era cerca de 65% em média, se tornou progressivamente menor, convergindo para um valor em torno de, aproximadamente, 25%, depois de um ciclo de dez dias. Por fim, demonstrou-se que, dentro de um determinado intervalo de aproximadamente 10° C, é possível criar uma escala com até cinco níveis de temperatura diferentes. Nessa escala, um usuário qualquer pode detectar e distinguir um patamar do outro.

No trabalho apresentado por Cardin et al. [5], foi desenvolvido um protótipo para melhorar a imersão dos pilotos em aeronaves operadas a distância. Os testes do protótipo foram conduzidos com cinco usuários diferentes, quais sejam, três homens e duas mulheres de 20 a 35 anos. Nenhum deles tinha experiência anterior com voos simulados. O experimento durou cerca de 20 minutos por participante. Na simulação, o principal objetivo do usuário é sustentar sua aeronave o maior tempo possível, enfrentando o vento, a fim de gerar a velocidade relativa máxima. Os voos ocorriam em círculos, o que produzida desorientação, obrigando, assim, o usuário encontrar a direção do vento produzido no sistema. Entre as tentativas, a direção do vento era alterada aleatoriamente. Para mascarar o som do ventilador, que podia ajudar a determinar de onde o vento estava vindo, alto-falantes foram usados para

transmitir os sons do simulador de voo. Os resultados mostraram que o erro médio para encontrar a direção correta do vento, entre os diferentes utilizadores, teve desvio padrão de 8,5°. Sobre o sentimento geral dos usuários, houve uma melhora na imersão e muitos acharam que o dispositivo é intuitivo. Uma das principais questões a serem tratadas é a latência do sistema devido à inércia do ventilador e à velocidade relativamente lenta do vento.

No modelo de resfriamento proposto por Xu et al. [45], que relaciona a velocidade do fluxo de ar com o calor removido da pele humana, 5 voluntários (com idades entre 21 e 28 anos, 1 mulher e 4 homens) participaram dos experimentos para verificar se a velocidade do fluxo do ar gerado pode ser considerada um estímulo frio. A velocidade do fluxo de ar igual a 2,0 m/s foi considerada como estímulo padrão e sete velocidades de fluxo (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 m/s) como estímulos de comparação. Para avaliar quantitativamente o desempenho da comparação, foi calculada a JND (*just-noticeable difference*), que pode ser definida como a quantidade que uma grandeza deve ser alterada para que a diferença seja perceptível. A média e o desvio padrão da JND dos 5 participantes foram 1,2818 m/s e 0,3304 m/s, respectivamente. Por fim, os resultados mostraram que quanto mais rápido o fluxo de ar, mais frio os usuários sentiram.

Wilberz et al. [28] apresentaram um sistema de atuadores baseado em um braço robótico acoplado a um HMD que realiza estímulos táteis no rosto humano. Neste sistema, dois estudos com usuários foram realizados: o quão bem os usuários podem perceber os estímulos direcionais; e como os estímulos táteis são percebidos em relação à imersão e resposta emocional. Dezesesseis participantes (19-47 anos de idade, idade média era de 32 anos, 5 mulheres) participaram de ambos os estudos com usuários. A maioria tinha experiência em videogame, enquanto a experiência com HMDs era menos comum. O ambiente simulado foi uma cena de floresta tropical criada no 3D Unity. O ambiente foi projetado para obter uma "experiência positiva" e foram adicionados estímulos através do FaceHaptics, que desencadeavam respostas emocionais positivas (por exemplo, felicidade, surpresa, admiração). Os resultados indicaram que os usuários podem perceber com facilidade as posições dos estímulos no rosto. Além disso, foi relatado que a direção dos estímulos táteis afetava positivamente o vínculo com uma sugestão visual. Por fim, é importante destacar que o braço robótico compensa o movimento da cabeça, tornando a experiência mais imersiva. Esse aspecto no design de hardware diferencia muito tal sistema em comparação com outras soluções HMD multissensoriais.

Para investigar o efeito da adição de estímulos olfativos e táteis na imersão dos participantes enquanto assistiam a um vídeo em 360° usando um HMD, foram realizados testes com 48 participantes (30 homens e 18 mulheres) entre 18 e 51 anos. Desses, três grupos foram formados: o primeiro para controle, no qual apenas estímulos visuais e auditivos foram fornecidos; no segundo grupo, o estímulo olfativo foi adicionado ao conteúdo visual e auditivo; por último, no terceiro grupo, o conteúdo visual e auditivo foi enriquecido com ventos. A principal conclusão foi a de que a adição de um estímulo olfativo aumenta significativamente a imersão, ao passo que a adição de um estímulo tátil, apesar de ter mostrado um impacto positivo, não foi estatisticamente significativo, indicando que o estímulo olfativo deve ser privilegiado sobre o tátil, por ser mais eficaz. Outra conclusão deste estudo é a de que o uso de estímulos olfativos ou táteis em um ambiente virtual não aumentou a *cybersickness*. Por fim, no teste de correlação de Pearson entre as variáveis independentes “imersão” e “*cybersickness*”, os resultados não mostraram correlações significativas entre nenhuma das variáveis medidas.

Um sistema de controle das características térmicas foi proposto por Narumi et al. [49]. Além disso, foi realizado um experimento para examinar como as características térmicas do espaço afetam o comportamento das pessoas no espaço. Seis protetores de ouvido térmicos foram desenvolvidos, o que permitiu que seis pessoas experimentassem o sistema ao mesmo tempo. Aproximadamente 400 pessoas, de várias idades, experimentaram esse sistema. Todos foram instruídos a colocar o protetor auricular e caminhar pelo espaço aberto para encontrar áreas confortáveis. As dimensões do espaço eram de cerca de 25m x 16m. Para examinar as trajetórias das pessoas naquele espaço, o sistema foi programado para registrar as posições dos usuários. Os resultados mostraram que é possível afetar o comportamento das pessoas reconfigurando um espaço aberto com estrutura espacial invisível. Neste artigo, os autores argumentam que o uso de informações térmicas é útil para criar uma estrutura espacial implícita. O resultado do experimento mostrou que a apresentação de informações térmicas afeta o comportamento das pessoas, fazendo com que elas se reúnam em áreas mais quentes.

Para validar o Haptic Around [33], um sistema de feedback híbrido de estímulos táteis integrado a um HMD, um estudo de usuário foi realizado com as seguintes condições: experimento realizado sem quaisquer sensações táteis; experimento realizado com feedback tátil somente no controle; experimento realizado com feedback tátil somente a partir do dispositivo fixo na parte superior; experimento realizado com ambos os dispositivos. Foram recrutados 16 participantes (8 homens e 8 mulheres) com idades que variavam de 20 a 29

anos (média = 23 anos). Desses, sete participantes nunca tinham usado um HMD antes. Foram apresentados seis cenários, com seus respectivos estímulos táteis, para os participantes: Sala de preparação; deserto temperado; vale do rio; deserto; montanha nevada; Sala de preparação. Após a conclusão de cada cenário, foi solicitado que preenchessem um questionário, que usou a escala Likert de 7 pontos (7 = concordo totalmente, 1 = discordo totalmente) e uma breve entrevista foi realizada. A ordem foi balanceada pelo latino-quadrado, que é um delineamento apropriado para ambientes experimentais heterogêneos. Os resultados demonstraram que o sistema é uma abordagem potencial para melhorar a experiência de imersão. Além disso, a maior parte dos usuários relatou ter desfrutado da sensação de umidade. A maioria dos participantes (10/16) mencionou que a percepção da névoa no ambiente é bastante significativa. Por fim, nos testes, a pontuação das cenas frias foi maior do que a das cenas quentes. Os participantes perceberam melhor a sensação de frio e ambientes úmidos, como o vale do rio e montanha nevada.

O ThermalWear [38], um protótipo vestível que estimula termicamente o tórax central (superior), possuiu o objetivo de aumentar a percepção das mensagens de voz com afeto com estímulos térmicos. Dois estudos foram realizados. O primeiro (N = 12) para investigar a percepção térmica e o conforto na parte superior do tórax. Em seguida, no segundo teste, foram, inicialmente, sintetizadas e validadas 12 mensagens de voz (N = 7) e, na sequência, foram analisados os efeitos dos estímulos térmicos (quente e frio) e do conteúdo das mensagens de voz (positivo e negativo) nas classificações de excitação e valência (N = 12). Os autores descobriram que a estimulação térmica do tórax pode alterar os níveis de excitação e valência. Além disso, concluíram que os estímulos térmicos no peito podem ser percebidos rapidamente (em aproximadamente 5 segundos) e que o equipamento não causa desconforto ao usuário.

No trabalho de Peiris et al. [39] foram apresentados três estudos que levaram ao desenvolvimento de uma pulseira térmica que estimula seis locais ao redor do pulso. Em primeiro lugar, três configurações de módulos térmicos com estímulos de aquecimento e resfriamento (com configurações de quatro, seis e oito módulos) foram comparados. Os resultados desse estudo indicaram que a resposta tátil térmica funcionou melhor com estímulos de resfriamento nos quatro (99%) e seis módulos (95%) colocados igualmente espaçados ao redor do pulso. Assim, com base nesses resultados e no conforto do usuário, foi selecionada a configuração de seis módulos. Em seguida, com a configuração selecionada, foi explorada a usabilidade em cenários do mundo real, como caminhar e ler. Nesse cenário, a

resposta térmica ao redor do pulso (89%) se mostrou melhor do que os estímulos de vibração (78%). Tais dados indicam a viabilidade de fornecer uma resposta tátil térmico no pulso. Por fim, foi investigada a capacidade do bracelete em fornecer uma resposta temporal espacial, enquanto o usuário desenvolve uma tarefa que o distrai, como, por exemplo, jogar um jogo. Tal estudo indicou que a resposta térmica pode ser adequada para a situação mencionada. Além disso, em todos os estudos, os estímulos térmicos tiveram um melhor desempenho em comparação aos estímulos de vibração.

Um protótipo tátil e um estudo de usuário foram elaborados por Kim et al. [42] com o objetivo de investigar os efeitos da variação da temperatura, em um contexto de interação com agentes inteligentes baseados em voz. Os resultados do estudo revelaram que: a interface térmica ajudou os participantes a entender melhor as informações; a integração da sensação de calor e som proporcionou uma experiência envolvente; um estímulo térmico funcionou como um canal de feedback adicional que complementa a interface de voz. Além disso, o estudo sugere que: o estímulo térmico pode apoiar a conscientização da informação e uma experiência imersiva; a sensação térmica pode estar associada à percepção de correto ou errado, verdadeiro ou falso e positivo ou negativo. No mesmo artigo, os autores discutem se a interação por toque é necessária e argumentam que em certos contextos, especialmente quando os comandos de voz permitiam que os usuários estivessem com as mãos livres, pode parecer desnecessária. No entanto, é possível considerar contextos apropriados onde a interação do toque possa ocorrer naturalmente, como, por exemplo, abraçar, dar as mãos ou acariciar. Para isso, é possível representar uma sensação quente e macia da pele humana, aplicando materiais que podem proporcionar uma impressão realista, como o silício, na região de toque.

2.4 DISCUSSÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o estado-da-arte para a geração de efeitos táteis por meio de fluxos de ar e de variação de temperatura. Conforme apresentado, poucas plataformas para geração de efeitos sensoriais dispõem de dispositivos com capacidade de produzir fluxos de ar com temperatura variável. Nos trabalhos reportados: (i) geralmente os usuários experimentam fluxos de ar produzidos por ventiladores que movimentam as moléculas de ar na temperatura ambiente e (ii) não há integração de componentes térmicos aos dispositivos destinados à produção dos fluxos de ar. Na solução de Ranasinghe et al. [26], que possui

ventiladores e atuadores térmicos, os ventos não são aquecidos ou resfriados. O mesmo vale para a solução de Hülsmann et al. [32], sendo que neste caso, o foco foi apenas a geração de calor - as lâmpadas eram usadas para aquecer a sala e não havia mecanismo para resfriá-las. Han et al. [34] também teve foco apenas na geração da sensação de calor, produzida por um soprador térmico que gera um fluxo de ar quente. Uma solução comum nos trabalhos citados foi o uso de umidificadores [36] ou transdutores ultrassônicos [34] [33] [46] para vaporizar a água e projetar junto ao fluxo de ar direcionado ao usuário. No entanto, tal solução visa gerar uma sensação térmica de resfriamento, não alterando efetivamente a temperatura do vento gerado. As soluções com tubos de vórtice e gelo seco foram mencionadas nos trabalhos de Xu et al. [45] e Nakajima et al. [46], respectivamente. Apesar de funcionarem bem de acordo com os autores, elas têm construção complexa e são pouco práticas. A primeira requer um compressor de ar, dispositivo grande e de difícil acesso, e a segunda possui requisitos complexos de armazenamento, exigindo o acondicionamento do tanque de polietileno em freezer a -78°C . Além dos dispositivos aprimorados com efeitos de vento aquecidos ou resfriados, foram avaliados dispositivos de aquecimento ou resfriamento por contato, com o intuito de identificar quais são os componentes mais usados para variação de temperatura. A pastilha Peltier foi utilizada em quase todos os protótipos avaliados [26] [39] [27] [38] [42] [43] [44] [49] para (i) fornecer mudanças relativamente rápidas de temperatura; (ii) possibilitar a geração (aquecimento) ou absorção de calor (resfriamento) em suas faces; e (iii) permitir um controle simples da temperatura [44]. Por outro lado, de acordo com Xu et al. [45], o tubo de vórtice, elemento escolhido pelos autores para reduzir a temperatura em seu protótipo, possuiu uma resposta no tempo muito melhor que a Peltier para resfriamentos, sendo indicada para aplicações nas quais este requisito é mandatório. Tal contradição deve ser investigada, mas pode ser atribuída a dificuldade de utilizar a pastilha para resfriar ou aquecer os ventos, sendo normalmente utilizada em protótipos de contato diretos com a pele humana. Brooks et al. [47] argumentaram que a pastilha de Peltier possuiu um consumo de energia muito elevado e propuseram uma solução que cria uma ilusão de temperatura estimulando o nervo trigêmeo. No entanto, a sensação de frio ou quente estimulada por odores pode ser influenciada por aspectos culturais [50]. A integração de dispositivos eólicos e térmicos em um contexto digital é desafiadora, pois os efeitos resultantes podem se cancelar (o vento dissipa o efeito térmico) e isso pode afetar a experiência do usuário. Embora tenha sido apresentado em uma seção anterior algumas tentativas focadas em fornecer esses efeitos separadamente, possivelmente a combinação deles pode aprimorar certos tipos de experiências (por exemplo,

experimental o clima em um ambiente virtual). Dada a importância de estímulos multissensoriais para uma maior sensação de imersão em multimídia e VR, é possível supor que a capacidade de emitir efeitos de vento de temperaturas específicas pode ter um impacto significativo na experiência do usuário. Assim, é nítida a importância do desenvolvimento de dispositivos térmicos eólicos e da realização de estudos de QoE do usuário para obter uma compreensão mais profunda de como alguém pode incorporar esses efeitos em um contexto multissensorial, a fim de maximizar a experiência do usuário.

3 A PLATAFORMA TWIRL

Neste capítulo, o processo de elaboração e implementação do sistema que permite a criação de ventos com a temperatura controlada, denominado *Twirl*, será detalhado. Inicialmente, será exposto o processo de construção dos dispositivos produtores de ventos resfriados. É importante destacar que, apesar de ser possível criar ambos os fluxos em um mesmo equipamento, esta opção foi descartada em testes preliminares porque o tempo de resposta para alternar a temperatura de frio para quente (e vice-versa) é muito alto, além da ocorrência de condensação interna nas transições rápidas de quente para frio. Em seguida, serão apresentados os dispositivos produtores de ventos aquecidos. Na seção seguinte, o diagrama elétrico é exibido. Nele, será possível visualizar as conexões elétricas de todo o sistema e, além disso, compreender a parte de controle em nível de hardware. Por fim, o conjunto de softwares, que garantem o controle dos dispositivos e a sincronização com os dados da mídia tradicional, serão apresentados.

A Figura 23 ilustra a acomodação dos dispositivos no sistema proposto, com dois pares de aparelhos, um à direita e outro à esquerda. As setas vermelhas indicam os fluxos de ar quente e as azuis, os de ar frio.

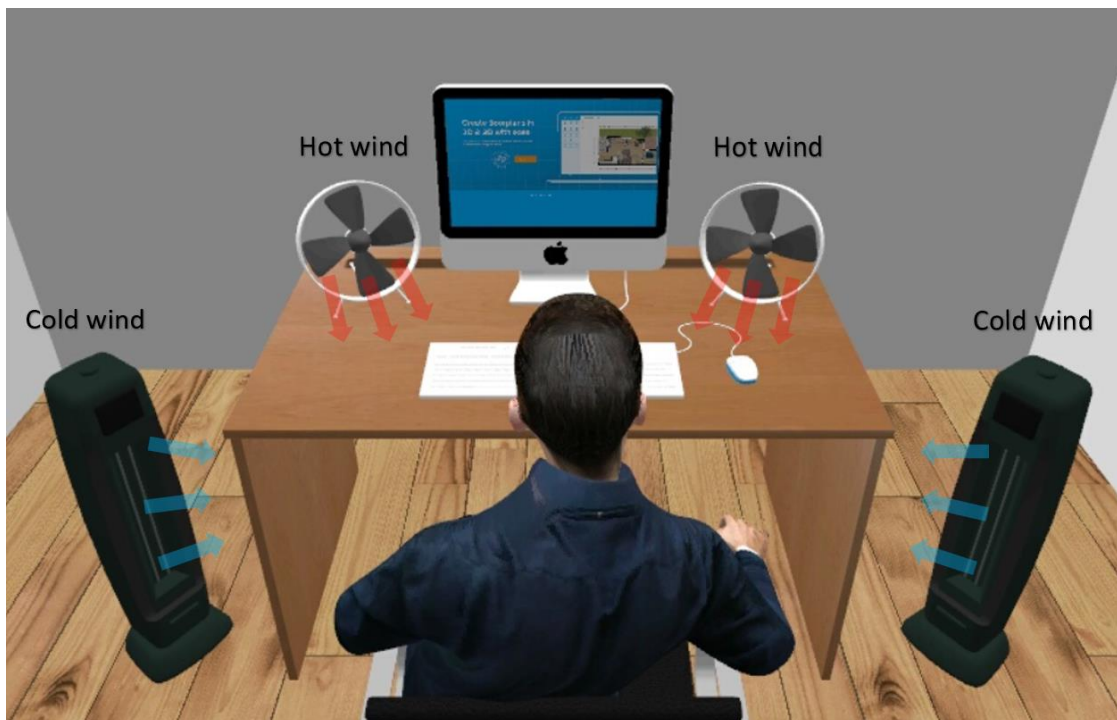


Figura 23 - Cenário de uso do Twirl com a possível disposição dos atuadores de vento frio e vento quente. Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 DISPOSITIVO DE VENTO FRIO

Conforme visto no Capítulo 2, a utilização de pastilhas Peltier é o método mais indicado para criar variações de temperatura. Além de permitir um controle simples, elas fornecem mudanças relativamente rápidas na temperatura. Portanto, o componente escolhido para obter o resfriamento foi a pastilha Peltier. Sua operação é baseada no “Efeito Peltier”, que é a transferência de calor de um semicondutor para o outro quando uma corrente elétrica passa por eles. A pastilha Peltier é capaz de esfriar e aquecer com a injeção de tensão elétrica (e corrente) em seus terminais.

O principal desafio em construir um dispositivo que permite ao usuário experimentar ventos resfriados é o método de remoção do calor do meio, ou seja, a remoção de calor do fluxo de ar. Inicialmente, o objetivo era resfriar o ar através da utilização de uma pastilha Peltier (TEC1-12712, 12V e 144W), dissipadores e um ventilador. A pastilha reduziria a temperatura no dissipador. O ar, através do ventilador, passaria dentro das ranhuras do dissipador e trocava calor, produzindo ventos frios. Porém, foi possível observar que a vazão da troca de calor era inferior à velocidade dos ventos. Desta forma, os ventos não permaneciam frios. O volume de ar que entrava no protótipo em temperatura ambiente era muito grande, e variava com a velocidade das hélices do ventilador. Quanto mais rápido as hélices giravam, maior a velocidade do fluxo de ar e, conseqüentemente, menor o tempo de contato do ar para que houvesse a troca de calor.

Por conseguinte, para contornar esse problema, foi proposta a utilização de água. Neste cenário, que pode ser observado na Figura 24, a Peltier (3) resfria a água que, por sua vez, é transformada em névoa. A névoa resfriada é direcionada ao usuário através de um ventilador. Assim, a troca de calor, que ocorre com a água ainda em estado líquido, não depende da velocidade do vento, uma vez que ocorre antes mesmo do ventilador ser ativado. Para transformar a água líquida em névoa, foi necessário a utilização de um umidificador ultrassônico (4) - que utiliza uma pastilha piezoelétrica. Esta vibra em altas frequências para criar pequenas gotículas de água. Para armazenar a água e permitir a troca de calor, um reservatório foi construído utilizando um perfil quadrado de alumínio (5) com 5cm x 5cm x 20cm. As dimensões do reservatório foram previstas para conter a menor quantidade de água possível e permitir um resfriamento mais veloz. Conforme dados do fabricante, o umidificador ultrassônico opera com um faixa de água de até 2 cm acima da pastilha piezoelétrica. Assim, o reservatório deve conter entre 75ml e 125ml de água para garantir o

funcionamento da pastilha piezoelétrica. Externamente ao reservatório, uma camada de isopor e uma capa confeccionada em impressora 3D, cuja a função é a de servir como isolante térmico, foram adicionadas. Para que a água seja resfriada, a pastilha Peltier foi posta em contato com a parte inferior do reservatório. Além disso, um dissipador de calor (2) e um cooler de resfriamento (1) foram adicionados à parte inferior do dispositivo, buscando dissipar o calor e evitando o equilíbrio térmico na pastilha Peltier. Finalmente, a névoa, que se forma dentro do reservatório com a ativação do umidificador ultrassônico, é retirada por um mini cooler (6). Em seguida, direcionada ao usuário pelo ventilador (7). Para produzir tais ventos, o ventilador (5000 RPM e 40 CFM) do equipamento amBX Gaming PC peripherals da Philips (Figura 6), foi escolhido. Ele permite um controle preciso da velocidade do fluxo de ar gerado.

Na Figura 24, é possível observar desde o detalhamento em 3D (à esquerda) até o resultado final (à direita) de um dos equipamentos de ventos resfriados. Uma fonte de 600w e 12V fornece energia para as pastilhas e coolers de dissipação dos equipamentos (esquerda e direita). Um microcontrolador Arduino Uno lança sinais de controle para um módulo de relés que ativa os umidificadores e os mini coolers. As conexões elétricas serão explicadas na Seção 3.3.

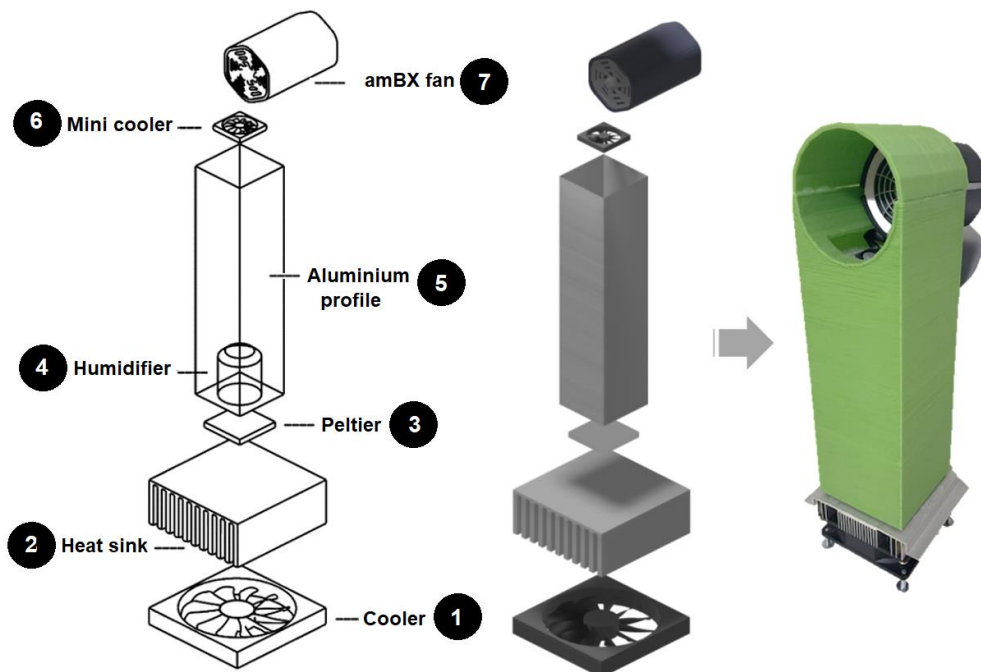


Figura 24 - O dispositivo de vento frio (esquerda) e sua estrutura montada (direita).

Componentes: (1)Cooler para dissipar o calor, (2)Pastilha Peltier, (3)Dissipador

de calor, (4)Reservatório de água, (5)Perfil de alumínio, (6)Mini cooler, (7)Ventilador amBX. Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 DISPOSITIVO DE VENTO QUENTE

A fim de produzir ventos quentes, dois secadores de cabelo, um para cada lado, foram utilizados. Estes contam com pequenos ventiladores e resistências que aquecem o ar. A potência de cada secador é de 1200w. No entanto, para não haver discrepância entre os dispositivos de ventos resfriados e ventos aquecidos, os secadores foram configurados para trabalhar a um quarto de sua potência máxima. Na Figura 25, é possível observar um dos secadores conectado ao módulo de relés, que é controlado pelo microcontrolador Arduino Uno.



Figura 25 - Dispositivo de vento quente, com o módulo de relés conectado a um Arduino Uno (esquerda) e um secador (direita). Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 DIAGRAMA ELÉTRICO

A seguir, na Figura 26, o diagrama elétrico do sistema é exibido. Nele, é possível visualizar quatro relés (1), que são controlados pelo microcontrolador Arduino. Um par deles

é responsável por acionar os secadores (esquerda e direita) (2) e o outro par aciona o conjunto de resfriamento dos dispositivos de ventos resfriados. Tal conjunto é formado pela pastilha piezoelétrica (DC 24V e 19W) (3), a fim de atomizar a água, e o mini cooler (5V e 1W) (4), para retirar a névoa do reservatório.

Em um circuito separado, para o contínuo fornecimento de energia, estão as pastilhas Peltier (12V e 144W cada) (5) e os coolers de resfriamentos (12V e 12W cada) (6), que são alimentados por uma fonte que entrega 600W e 12V (7).

Os secadores trabalham em corrente alternada e consomem 300W cada um. Desta forma, a potência total drenada da rede elétrica pelo sistema é 960W, considerando os ventiladores do amBX Gaming PC peripherals da Philips, cuja potência é de aproximadamente 8W.

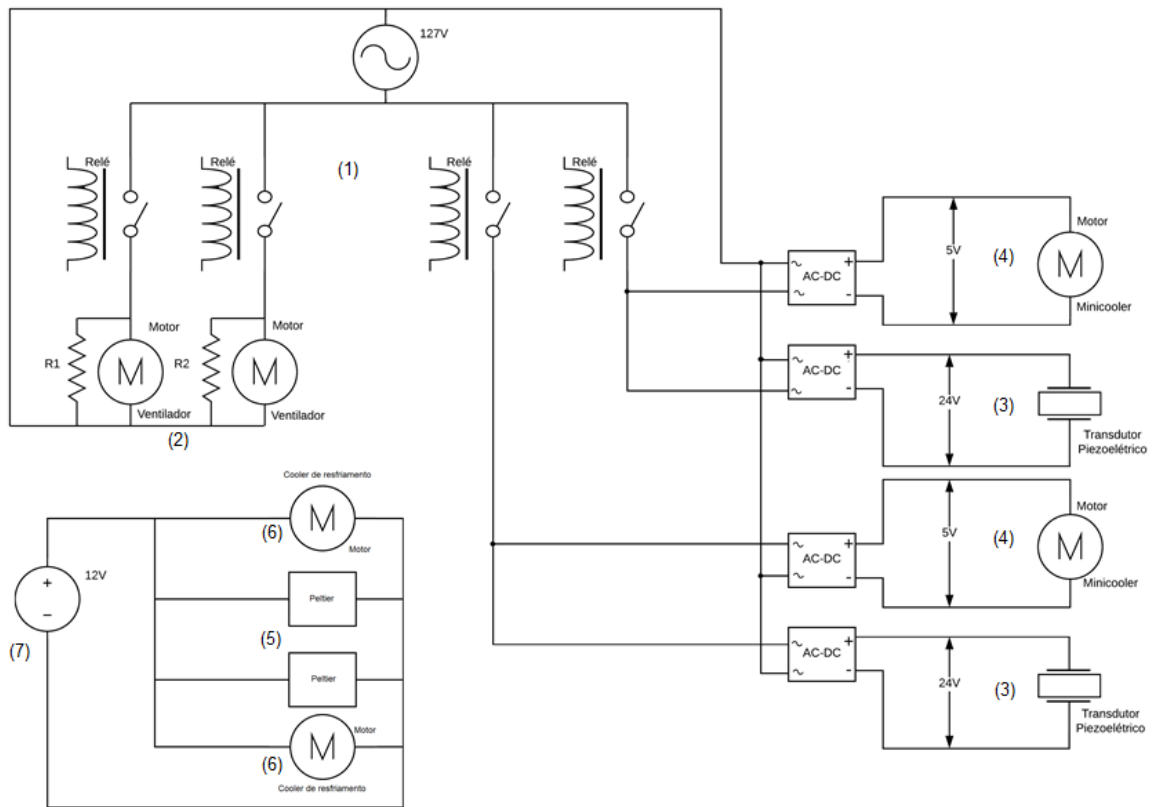


Figura 26 - Diagrama elétrico. Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 INTEGRAÇÃO E SINCRONIZAÇÃO COM O CONTEÚDO MULSEMÍDIA

Conforme visto até a Seção 3.3, o microcontrolador Arduino é o responsável por enviar os sinais de controle para os relés, que, por sua vez, ativam ou desativam os efeitos sensoriais. No entanto, tais sinais de controle devem estar contextualizados com o conteúdo de mídia tradicional, ou seja, sincronizados e integrados. Nesse sentido, o padrão ISO/IEC 23005, também conhecido como MPEG-V, provê uma arquitetura e especifica representações de informação para conectar o mundo virtual (ex. jogos, simuladores e aplicações) ao mundo real (ex. sensores e atuadores) [11]. Assim, a plataforma PlaySEM, que é composta pelo aplicativo PlaySEM SE Vídeo Player [11] e pelo Mulsemmedia Renderer System (MRS) [17], foi instalada e configurada em um computador. A principal função do MRS é lidar com dispositivos heterogêneos para renderizar efeitos sensoriais. O Vídeo Player é capaz de ler metadados de efeitos sensoriais (SEM - Sensory Effect Metadata) no formato MPEG-V e se comunicar com o renderizador de efeitos sensoriais, que transforma os metadados em comandos para os atuadores. Tal Plataforma traz uma abordagem para a renderização de efeitos sensoriais em ambientes domésticos compatível com o padrão MPEG-V. A arquitetura da PlaySEM (SE Vídeo Player e SE Renderer) se baseia em componentes abertos, como Cling UPnP Core para comunicação UPnP entre o Vídeo Player e o renderizador, VLCJ para reproduzir vídeos a partir da própria interface do programa Java, e o MPEG Metadata para empacotar e desempacotar XML contendo metadados de efeitos sensoriais. A plataforma foi projetada com a finalidade de permitir que o renderizador de efeitos sensoriais bem como os atuadores possam ser reaproveitados em outras interfaces de apresentação

Na Figura 27, que descreve o sistema, o computador (com o PlaySEM instalado) é responsável pelo processamento dos metadados de efeitos sensoriais adicionados ao conteúdo do vídeo (SEM e AV) e pelo envio dos sinais de comando para o microcontrolador (Arduino) e para o Ambx Controller. Os dados lidos pelo PlaySEM podem estar na nuvem ou localmente. Tanto o amBX Controller quanto o microcontrolador são conectados ao computador via USB. O subsistema de ar frio é composto por: (i) uma parte que efetivamente produz o fluxo de ar, com o uso dos dois ventiladores do Philips AmBX, conectados via um cabo ao sistema proprietário de controle do AmbX e; (ii) outra parte que resfria o ar (conjunto de resfriamento), conectada por cabo ao microcontrolador. Já o subsistema que gera fluxos de ar quente é conectado via cabo ao microcontrolador.

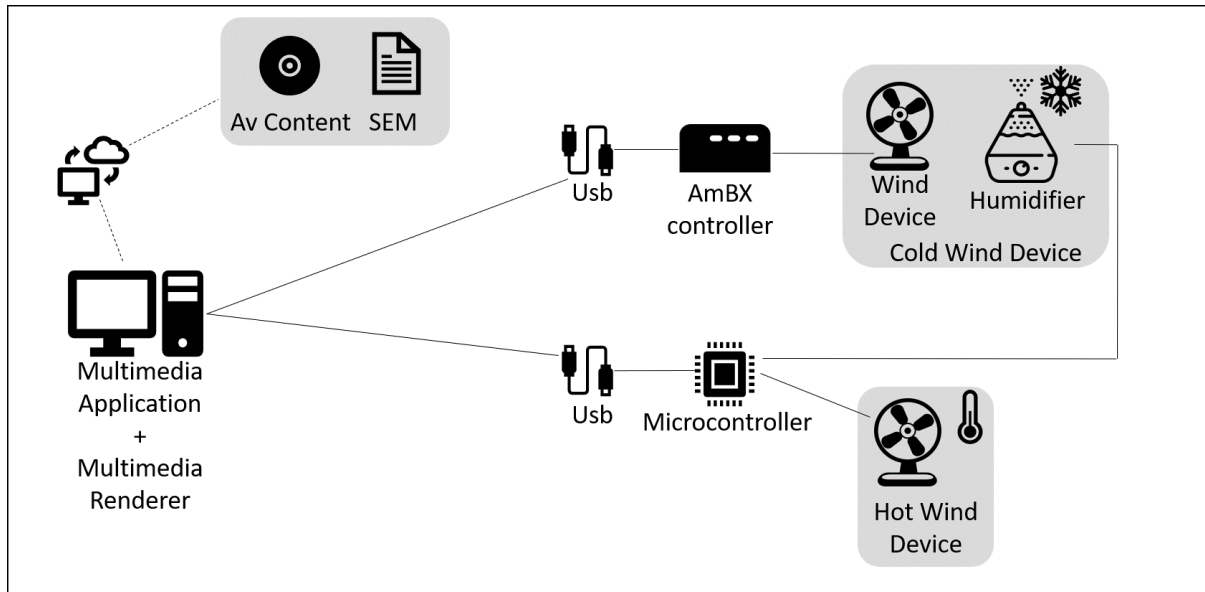


Figura 27 – Visão geral do Twirl. Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 COMPONENTES ELETRÔNICOS

A seguir, é apresentada a lista de componentes necessários para a construção do sistema *Twirl*, que foi acoplado à plataforma de apresentação multimídia PlaySEM SER e à plataforma Philips AmBX.

Tipo	Componente	Objetivo	Preço	Quant
Microcontrolador	Arduino Uno	Receber comandos a partir do processador multemídia e ativar o dispositivo.	R\$70	1
Componente eletrônico	TEC1-12712 40x40mm Thermoelectric Cooler Peltier 12V	Componente termoeletrico capaz de esfriar e aquecer com a injeção de tensão em seus terminais.	R\$40	2
Componente térmico passivo	Dissipador	Dissipar o calor na pastilha Peltier.	R\$35	2
Componente eletrônico	Cooller 12v	Ajudar na dissipação do calor nos dissipadores.	R\$35	2
Componente eletrônico	Shield de relés	Ligar e desligar os produtores de nevoa e os secadores.	R\$40	1
Fonte elétrica	Fonte Chaveada	Alimentar eletricamente o sistema.	R\$150	1

	12V e 600W			
Secador de cabelo	Secador de Cabelos Mondial Max Travel SC-10 Bivolt	Produzir ventos quentes.	R\$40	2
Mini Cooler	Cooler De 7mm Para Raspberry Pi 3 Pi3 - 30x30x7mm 5v	Remover a nevoa do reservatório de água.	R\$25	2
Umidificador ultrassônico	Umidificador piezoelétrico ultrassônico 24v	Equipamento que transforma a água em nevoa.	R\$40	2
Tubo Quadrado de alumínio	Tubo quadrado de alumínio com 5cm x 5cm x 20cm	Reservatório para água.	R\$10	2

Tabela 2 – Lista de Componentes da Plataforma Twirl. Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6 DISCUSSÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu o processo de construção do *Twirl*. Inicialmente, os dispositivos responsáveis por entregar fluxos de ar resfriados foram exibidos. Na sequência, os dispositivos de ventos aquecidos, o diagrama elétrico e os softwares responsáveis pela integração e sincronização com o conteúdo multemídia foram apresentados. Uma tabela descritiva contendo todos os componentes utilizados e seus objetivos no projeto foi exposta.

Na Figura 28 é possível observar o sistema finalizado. A foto foi tirada a partir da visão do usuário, no qual é esperado que ele se posicione frontalmente em relação à tela e os produtores de fluxo de ar aquecidos e resfriados fiquem à direita e à esquerda da tela. Na parte inferior a direita, é possível observar uma fotografia, obtida por uma câmera térmica, do sistema em funcionamento, sendo que a cor azul escuro representa regiões frias e a vermelha, regiões quentes. Uma câmera termográfica é capaz de captar imagens emitidas através da radiação infravermelha. Todo corpo que possui uma temperatura acima do zero absoluto emite luz infravermelha. Dessa maneira, quanto maior a radiação emitida, maior será a temperatura do corpo observado. Na fotografia térmica em questão, as partes vermelhas representam a radiação emitida pelas resistências dos secadores de cabelo. As partes em azul escuro, que aparecem nos corpos dos dispositivos de ventos resfriados, representam a baixa

radiação emitida pela estrutura do dispositivo. Vale destacar que, numa hipótese de vedação perfeita do reservatório da água resfriada, a fotografia não seria capaz de distinguir as temperaturas dos reservatórios. Assim, tal fotografia tem o objetivo de apenas caracterizar o sistema e não visa mostrar as intensidades térmicas de cada dispositivo. Testes de performance serão apresentados nos próximos capítulos.



Figura 28 - O sistema Twirl. Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante destacar que tal solução permite, com facilidade, a adição de mais dispositivos de ventos aquecidos e resfriados, aumentando a intensidade dos efeitos e, provavelmente, a imersão. Tal escalabilidade se deve, principalmente, porque o sistema é de fácil construção, está integrada ao PlaySEM e possui um baixo consumo energético, sobretudo quando comparado a outras soluções apresentadas no Capítulo 2.

Os dispositivos de ventos resfriados são controlados simultaneamente pelo microcontrolador Arduino e pelo Ambx controller, para ativar os conjuntos de resfriamento e os ventiladores, respectivamente. Assim, a plataforma PlaySEM, em seu aspecto de heterogeneidade, permitiu uma integração bastante facilitada entre o microcontrolador Arduino e o Ambx controller.

Ao longo do projeto e da implementação do sistema, várias dificuldades surgiram. As principais considerações são as seguintes:

- A elevada complexidade em construir, em apenas um equipamento, um dispositivo que produza tanto ventos aquecidos quanto ventos resfriados. O tempo de transição é muito elevado, degradando a usabilidade.
- Garantir a efetiva troca de calor entre a pastilha Peltier e o fluído para obter ventos resfriados.
- A conversão da energia elétrica em calor é bastante simples. Por conseguinte, o dispositivo de ventos aquecidos possuiu uma fácil implementação. No entanto, não se pode afirmar o mesmo para o equipamento de ventos resfriados, uma vez que remover calor do meio é uma tarefa mais complexa.

4 EXPERIMENTO E MÉTODOS

No capítulo anterior foi apresentada a plataforma *Twirl*, assim como todo o processo de concepção e construção. Entender a abrangência dos efeitos produzidos pelo sistema também se faz necessário. Neste sentido, é importante compreender que, semelhante aos efeitos sensoriais olfativos, os efeitos baseados em vento também são propensos a efeitos prolongados. No entanto, diferentemente dos meios olfativos cuja intensidade é monodimensional - apenas a intensidade do aroma que varia como resultado da persistência - a intensidade dos estímulos dos ventos aquecidos ou resfriados é bidimensional, ou seja, tanto a temperatura quanto a intensidade do fluxo de ar são afetados pelo prolongamento dos efeitos [51] [52]. Assim, neste capítulo, serão descritos os métodos e materiais utilizados para realizar quatro testes no sistema. Os dois primeiros objetivaram verificar a variação da temperatura dos ventos resfriados e aquecidos em um tempo pré-determinado. Eles foram realizados em dois cenários, com temperaturas ambiente em 20°C e 28°C. Já o terceiro analisou a variação da temperatura no decorrer de três vídeos anotados com efeitos sensoriais de vento frio e vento quente, sendo o primeiro com os dois efeitos, o segundo somente com ventos aquecidos e o terceiro com ventos resfriados. Por fim, o quarto teste foi realizado para obter a resposta do subsistema em função da distância.

4.1 MATERIAIS

Na execução dos testes, foram necessários, além dos dispositivos que integram o *Twirl*, componentes de hardware e software que serão apresentados nessa Seção.

4.1.1 Hardware

Vários itens foram utilizados para realizar os experimentos propostos, além dos já mencionados na construção do sistema. A velocidade dos ventos e a temperatura da água no reservatório foram medidas através de um Anemômetro Digital Benetech GM816 e um Termômetro Digital de Aquário TPD-10, respectivamente. Para realizar as medições da temperatura do fluxo de ar nos testes, um Raspberry pi 3 foi utilizado em conjunto a um sensor DHT11, conforme a Figura 29. Um disco com a função de anteparo, feito de parafina (40 mm de diâmetro x 2 mm de espessura), foi usado para avaliar a temperatura de emissão

dos ventos dos dispositivos de diferentes distâncias, juntamente com uma câmera térmica, Therm-App TA19A17Q-1000, a fim de estimar a temperatura no disco.



Figura 29 - Sensor para monitor a temperatura. No lado esquerdo, o Raspberry Pi 3; e, no lado direito, o sensor DHT11. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Vídeos

Os seguintes vídeos⁵ foram utilizados para os testes:

- **Bardarbunga:** retrata o sobrevoo de um drone sobre o vulcão subglacial em erupção, cujo nome é Bardarbunga e tipo estratovulcão, localizado debaixo da camada de gelo do glaciar Vatnajökull, no Parque Nacional de Vatnajökull, Islândia. Possui duração de 128 segundos.
- **Sandboarding:** exhibe o personagem em primeira pessoa praticando o esporte Sandboarding. Este consiste em equilibrar-se sobre uma prancha na superfície de dunas de areia. Possui duração de 36 segundos.

⁵ Disponível em: https://www.youtube.com/playlist?list=PL_yjQ5Ruo65c7hAhh3fhXkgJNsSoBHY7x

- **Snowboarding:** semelhante ao vídeo anterior, porém, neste caso, o esporte consiste em equilibrar-se sobre uma prancha na superfície coberta de neve das encostas de montanhas. Possui duração de 29 segundos.

Todos os vídeos tem a mesma resolução, qual seja, Full HD, e foram reproduzidos a uma taxa de 30 quadros / segundo. O experimento foi realizado com três vídeos a fim de explorar as possibilidades de misturas de sensações de temperatura proporcionadas por ventos frios e quentes percebidas pela pele do usuário. Os vídeos Snowboarding e Sandboarding exploraram os ventos frios e os ventos quentes, respectivamente. Já Bardarbunga explorou a mistura dos dois tipos de ventos. A seguir, na Figura 30 são mostrados quadros dos vídeos descritos.

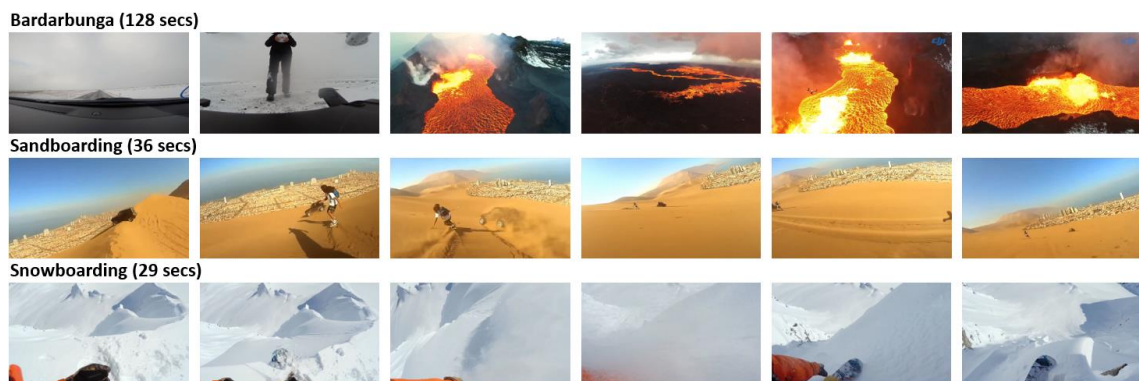


Figura 30 - Vídeos utilizados no experimento para verificar a variação de temperatura em um sistema multissensorial digital com anotações de efeitos sensoriais congruentes às cenas. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 PROCEDIMENTO

Foram realizados quatro testes: teste do dispositivo de vento frio, dispositivo de vento quente, variações de temperatura em vídeos anotados com efeitos sensoriais, e teste para análise da resposta em função da distância. Além disso, uma pesquisa para avaliar os aspectos subjetivos relacionados ao sistema foi realizada.

O teste dos equipamentos produtores de ventos aquecidos teve a duração de 30 segundos e o teste dos equipamentos produtores de ventos resfriados teve a duração de 60 segundos. Tal diferença se deve à necessidade de se observar o comportamento do fluxo de ar

após a névoa ser desligada. Em outras palavras, verificar se a queda de temperatura foi ocasionada apenas pelo fluxo de ar, que naturalmente remove calor.

Os testes foram repetidos vinte vezes para eliminar possíveis erros de leitura do sensor e foram realizados em dois cenários diferentes. Cada cenário consiste em uma temperatura ambiente diferente: 20°C e 28°C. Por fim, utilizando um anemômetro, a velocidade dos ventos foi medida em ambos os dispositivos. As medições de temperatura e velocidade do vento foram feitas a 15 cm de cada dispositivo.

4.2.1 Teste Dispositivo de Vento Frio

O teste foi dividido em duas partes. A primeira verificou o resfriamento da água no reservatório. Tal resfriamento sempre ocorre antes do ventilador e a geração da névoa serem ativados. A segunda parte, por sua vez, buscou medir a velocidade e a temperatura dos ventos que são direcionados ao usuário. Assim, nessa etapa, a névoa foi produzida por 5 segundos sem que os ventos fossem ativados. Nos 30 segundos seguintes, os ventos em conjunto com a névoa ficaram ativos. Depois disso, por mais 25 segundos até que a medição terminasse, a névoa foi interrompida. Para todos os cenários, o reservatório iniciou preenchido com 125 ml de água em temperatura ambiente (volume máximo para que a pastilha piezoelétrica consiga produzir a névoa). A temperatura ambiente foi medida a um metro de distância dos dispositivos e fora do raio de atuação do fluxo de ar.

4.2.2 Teste Dispositivo de Vento Quente

Para os ventos quentes, os testes foram realizados da seguinte forma: medição da velocidade do vento e da temperatura do fluxo de ar ao longo de 30 segundos. O secador foi configurado para trabalhar a um quarto (300W) da sua potência máxima (1200W). Como no caso anterior, a temperatura ambiente foi medida a um metro de distância dos dispositivos e fora do raio de atuação do fluxo de ar.

4.2.3 Variações de Temperatura em Vídeos Anotados com Efeitos Sensoriais

Neste teste, que foi realizado com os três vídeos já apresentados na seção 4.1.3, o objetivo era verificar o comportamento do sistema em uma condição mais próxima da de uso. Diferentemente dos anteriores, o tempo de cada teste condicionou-se à duração de cada vídeo. Além disso, a renderização dos efeitos sensoriais seguiu as respectivas anotações congruentes com as cenas de cada vídeo. Essas anotações foram criadas manualmente, a partir das observações, também, das cenas de cada vídeo.

4.2.4 Teste para Análise da Resposta em Função da Distância

Neste experimento, uma pastilha de parafina (Figura 32) foi confeccionada e utilizada como anteparo. A pastilha, conforme a Figura 31, foi colocada a 15, 45, 75 e 100 cm de ambos os ventiladores (ventos aquecidos e ventos resfriados). Durante 60 segundos, tempo de duração do teste para cada distância, a temperatura no anteparo foi medida utilizando uma câmera térmica. O valor da capacidade térmica específica da parafina, grandeza física que determina a quantidade de calor que um corpo precisa para alterar sua temperatura em uma unidade, é 2,9 kJ/kg.K. O valor da capacidade térmica específica da pele humana, segundo Giering et al. [53], é 3,39 kJ / kg.K. Dessa forma, a parafina, por ter uma capacidade térmica específica relativamente próxima à da pele humana, é um material indicado para o teste.



Figura 31 - Anteparo de parafina posicionado em frente ao secador. Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 32 - Anteparo de parafina posicionado em tripé para medição. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.5 Pesquisa Sobre a Aceitação, a Compreensão e a Imersão dos Usuários

Além das avaliações técnicas sobre desempenho do *Twirl*, um estudo para explorar os aspectos subjetivos relacionados ao sistema foi conduzido em parceria com a University of Kent, pela Professora Dra. Alexandra Covaci [54]. Várias questões foram abordadas, tais como:

- a) Os usuários consideram o *Twirl* útil e/ou fácil de usar?
- b) Qual é a qualidade de experiência percebida pelos usuários do *Twirl*?
- c) Quão envolventes ou realistas são as experiências enriquecidas com ventos aquecidos e/ou resfriados através do *Twirl*?
- d) Quais são as aplicações que o *Twirl* pode ser integrado?

Para responder a essas perguntas, foi desenvolvida uma pesquisa on-line. Tal pesquisa é composta por dois vídeos⁶ que demonstram o uso do *Twirl* e por 37 questões que foram extraídas das seguintes fontes:

- Versão resumida do *User Experience Questionnaire* (UEQ) [55];
- Seções sobre utilidade, facilidade de uso, prazer e intenção de uso do questionário Modelo de Aceitação de Hardware de Realidade Virtual (*Virtual Reality Hardware Acceptance Model*, VR-HAM) [56];
- Perguntas que avaliam a utilidade percebida do *Twirl* em uma série de possíveis aplicações, como: turismo, treinamento, meditação.
- Seção sobre a imersão e uma questão que trata sobre a percepção da temperatura no *The Temple Presence Inventory* (TPI) [57];

O questionário foi disponibilizado em uma postagem no *Tweeter* e 65 participantes clicaram no *link*. No entanto, apenas 43 registraram suas respostas.

O UEQ-S, que foi utilizado nesta pesquisa, é uma versão mais curta do UEQ [58] que mede duas dimensões - qualidade hedônica e qualidade pragmática -, cada uma com quatro itens. Na Tabela 3 é possível visualizar os itens de cada dimensão (qualidade pragmática, os quatro primeiros, e qualidade hedônica, os quatro últimos). Tal questionário possui o objetivo de mensurar a experiência do usuário em produtos interativos, sendo composto por uma escala de sete estágios. Os itens foram dimensionados de -3 a +3. O -3 representa a resposta mais negativa, o 0 uma resposta neutra e o +3 a resposta mais positiva. A média de todos os itens é usada como uma síntese geral da experiência do usuário.

⁶ Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=_yLN27AVoxk

Restritivo	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Útil
Complicado	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Fácil
Eficiente	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Ineficiente
Autoexplicativo	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Confuso
Emocionante	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Entediante
Interessante	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Desinteressante
Inovador	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Conservador
Pioneiro	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	Ordinário

Tabela 3 – O Questionário UEQ-S. Fonte: Schrepp et al. [55].

A fim de entender as intenções dos usuários em relação ao *Twirl*, foi usada uma versão revisada do Modelo de Aceitação de Hardware de Realidade Virtual (VR-HAM) [56]. As perguntas visaram a percepção da utilidade, a facilidade de uso, intenção de uso e o prazer em usar *Twirl*. Os respondentes avaliaram as afirmações em uma escala do tipo Likert de 5 pontos (1: Discordo totalmente e 5: Concordo totalmente).

No estudo e criação de experiências mediadas, é importante investigar se os usuários de mídia interativa ou não interativa experimentam a imersão - um senso de conexão com ambientes e eventos reais e fictícios. Para avaliar se o *Twirl* tem um impacto positivo na imersão e no realismo, foram utilizadas questões do TPI [57]. Este questionário tem como objetivo oferecer uma medida mais ampla de imersão das mídias, que vai além da RV. Os entrevistados avaliaram as afirmações em uma escala do tipo Likert de 7 pontos, sendo 1 “De modo nenhum” e 7 “Muitíssimo”.

5 RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados e análises dos testes realizados com os equipamentos produtores de fluxo de ar quente e frio. Os gráficos apresentados sintetizam os dados experimentais obtidos. Neles, as linhas verticais de cor vermelha identificam os momentos em que os efeitos sensoriais foram ativados e desativados. No caso dos testes dos vídeos, também denotam a anotação dos efeitos sensoriais. A Tabela 4 apresenta os símbolos nas linhas para cada efeito.

W	Vento ambiente Ativado
!W	Vento ambiente Desativado
HW	Vento quente Ativado
!HW	Vento quente Desativado
M	Névoa fria Ativada
!M	Névoa fria Desativada

Tabela 4 - Símbolos Utilizados para Identificar os Efeitos Sensoriais que são Ativados e Desativados nos Gráficos. Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1 ANÁLISE DO DISPOSITIVO DE VENTO FRIO

Antes de ligar o dispositivo de vento frio, o reservatório de água precisa ser resfriado para que o dispositivo possa liberar o efeito desejado. Assim, a Figura 33 apresenta a variação da temperatura da água no reservatório em função do tempo. Nela, são representados dois cenários: a curva de cor azul, cuja temperatura ambiente era 20°C e a curva preta e tracejada, na qual a temperatura ambiente era 28°C.

No primeiro cenário, a temperatura da água no reservatório variou 22,6°C em 70 minutos, iniciando em 28°C e estabilizando em 5,4°C. O Segundo, cuja temperatura ambiente era de 20°C e, portanto, iniciando em 20°C, teve a temperatura final registrada em 0,3°C. Desta forma, variou, aproximadamente, 20°C em 40 minutos.

Melhorias precisam ser realizadas para que a água atinja a temperatura de operação mais rapidamente, embora não influencie diretamente na usabilidade, visto que esse processo ocorre antes do uso do sistema. Uma forma de obter tais melhorias é adicionar mais pastilhas Peltier ou trocando as atuais por pastilhas de maior potência. Isso reduziria, portanto, o tempo

de resfriamento da água no recipiente. No entanto, também aumentaria o custo do sistema e consumo de energia.

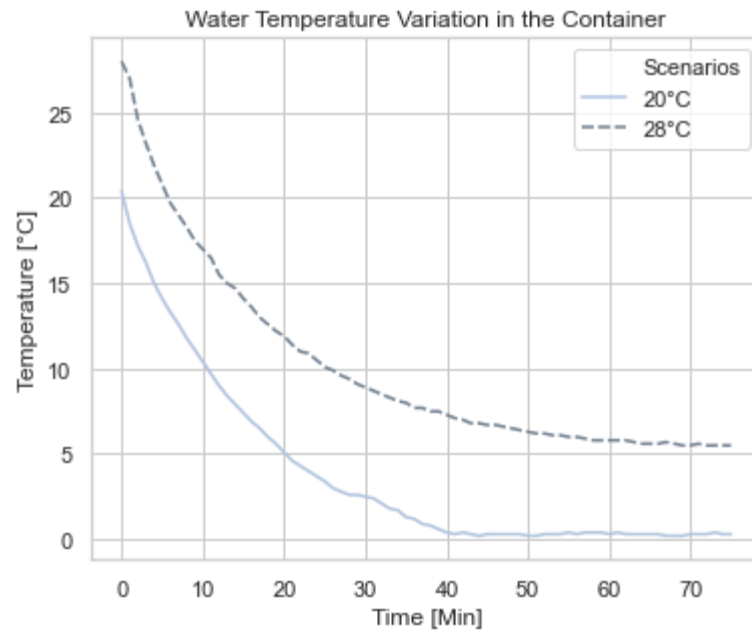


Figura 33 - Variação da temperatura da água no reservatório em função do tempo. Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 34 exibe a temperatura dos fluxos de ar frio ao longo do tempo, em ambos os cenários.

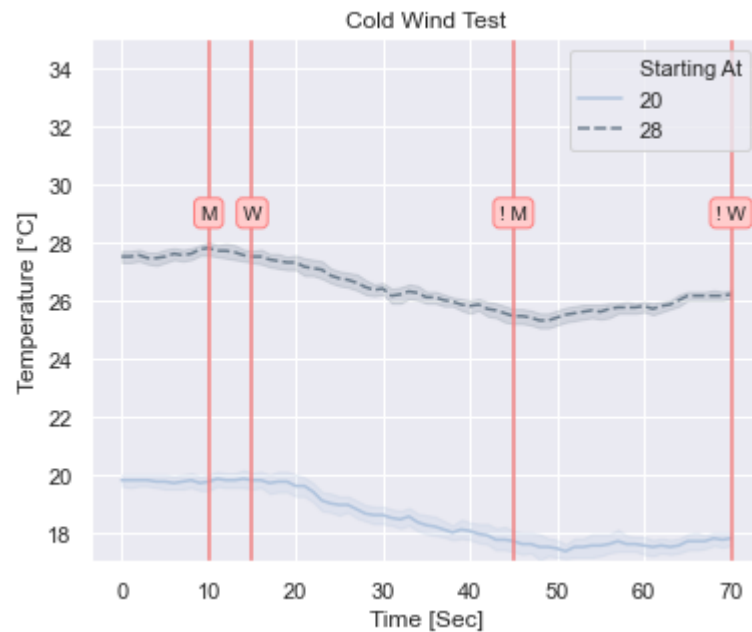


Figura 34 - Resultado do teste do dispositivo de fluxos de ar frio em dois cenários. O gráfico exibe a temperatura dos fluxos de ar frio ao longo do tempo. Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos primeiros 15s não foram gerados ventos, apenas ocorreu a vaporização da água a partir do instante 10s. A água no reservatório, no momento em que se iniciou a vaporização, estava aproximadamente a 5,4°C e 0,3°C no primeiro e no segundo cenários, respectivamente. Em seguida, os ventos foram ativados e a vaporização permaneceu ativa. A partir do quadragésimo quinto segundo, ou seja, 30s após o fluxo de ar ser iniciado, a vaporização foi desligada e os ventos continuaram a ser produzidos, porém, em temperatura ambiente.

É possível observar que, durante os 30s em que a névoa resfriada ficou ativa juntamente com os ventiladores, ambas as curvas de temperatura sofreram uma queda. Porém, no momento em que a névoa foi desativada, restando apenas o ventilador operando em temperatura ambiente, as temperaturas do fluxo de ar, para as duas curvas, se elevaram um pouco.

Assim, o resultado médio, em ambas as curvas, é uma queda na temperatura de aproximadamente 2°C, em 30s, e pontos de mínimo em 25,5°C e 17,5°C para os cenários 1 e 2, respectivamente. A velocidade do vento foi, em média, 1 m/s. O volume de água no reservatório no final dos testes foi 118ml, em média.

5.2 ANÁLISE DO DISPOSITIVO DE VENTO QUENTE

A Figura 35 apresenta a síntese dos 20 testes realizados com o dispositivo de fluxos de ar quente. Nela, é possível observar uma elevação da temperatura de aproximadamente 10°C, em 30s, e pontos de máximo em 37°C e 30°C para os cenários 1 e 2, respectivamente. A velocidade do vento foi 1,4 m/s, em média. A desproporção nas taxas observadas para as respostas dos atuadores de aquecimento e resfriamento se deve ao fato de que os secadores de cabelo, mesmo trabalhando com um quarto de sua potência máxima (300W cada), possuem quase o dobro daquela demandada pelas pastilhas Peltier (144W cada). Além disso, é necessário considerar que a conversão da energia elétrica em calor é bastante simples. No entanto, remover calor do meio é uma tarefa mais complexa.

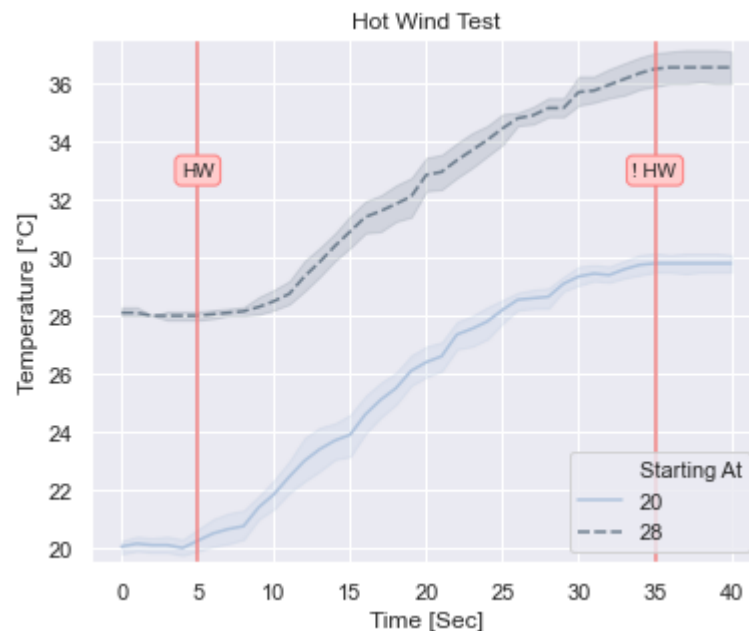


Figura 35 - Resultado do teste do dispositivo de fluxos de ar quente em dois cenários. O gráfico exibe a temperatura dos fluxos de ar quente ao longo do tempo. Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 FLUXOS DE AR SINCRONIZADOS COM OS VÍDEOS

Neste teste, a atuação dos dispositivos foi guiada pelas anotações de efeito sensorial feitas manualmente para cada vídeo. Segundo Jones e Berris [59], para que um usuário perceba uma mudança na temperatura, ela deve ocorrer a uma taxa superior a 0,5 °C/min ou

se deslocar para fora da zona “neutra” de 30 a 36°C. Nos experimentos descritos nas seções anteriores, que verificaram o comportamento da temperatura do fluxo de ar ao longo do tempo, a taxa de alteração da temperatura foi de 4°C/min e 20°C/min para os ventos resfriados e aquecidos, respectivamente. Além disso, para Kim et. al. [42] e Wilson et al. [43], a variação de 1°C garante a percepção da alteração da temperatura. Dessa forma, a amplitude e a taxa de variação da temperatura são suficientes para que o usuário seja capaz de perceber as variações térmicas dos fluxos de ar.

As anotações dos vídeos foram definidas levando-se em conta as limitações observadas. Assim, para tentar compensar os atrasos de propagação dos efeitos no ambiente, as anotações foram configuradas para que o controle disparasse as emissões de fluxos de ar frio/quente cerca de 15s/5s antes do início efetivo das respectivas cenas com estímulos frios/quentes (tempos médios para a variação de 1°C).

A Figura 36 mostra o comportamento da temperatura do fluxo de ar durante a exibição de cada um dos três vídeos, da esquerda para direita, Bardarbunga, Sandboarding e Snowboarding. Para o primeiro, que mistura as sensações de frio, no começo, e as sensações de calor, ao final, as temperaturas mínimas e máximas registradas foram 26,5°C e 39°C, para o cenário 1 e 17°C e 29°C, para o cenário 2. No segundo, a temperatura máxima registrada foi 37°C e 26°C para os cenários 1 e 2, respectivamente. E, no último, a temperatura mínima registrada foi 22,5°C e 17,5°C para os cenários 1 e 2, respectivamente.

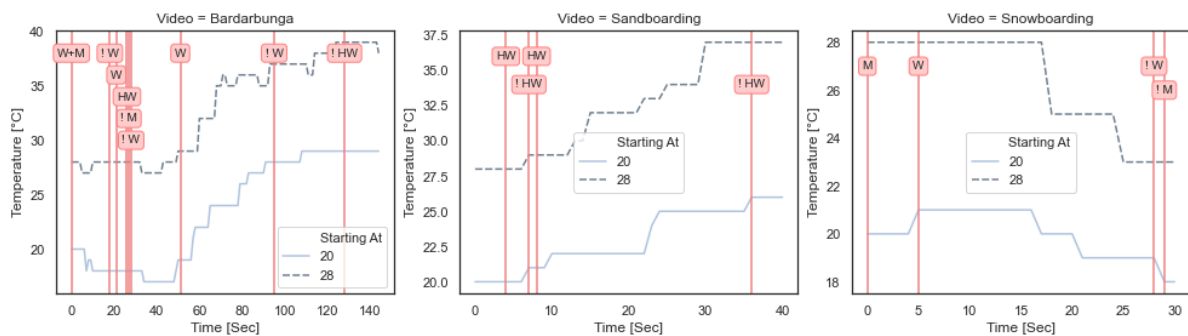


Figura 36 - Comportamento da temperatura do fluxo de ar durante a exibição dos três vídeos.

Marcas da anotação: W: Vento ativado, !W: Vento desativado, HW: Vento quente ativado, !HW: Vento quente desativado, M: Névoa ativada(Frio) e !M: Névoa desativada. Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 ANÁLISE DA RESPOSTA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA

Como esperado, os resultados mostraram que quanto mais perto da fonte de vento, seja aquecido ou resfriado, maior o efeito no anteparo. Segundo a Norma Regulamentadora 17 [60] (NR17), que aborda as boas práticas de ergonomia, para conseguir um conforto visual é preciso que o monitor esteja distante dos seus olhos entre 45cm e 70cm. Assim, como os produtores de vento devem estar o mais próximo possível do usuário e, neste cenário, devem estar alinhados com o monitor, a distância de 45cm é a indicada para o uso. Vale destacar que para utilizar o sistema com óculos de realidade virtual tal distância pode ser reduzida, aumentando o efeito dos ventos.

A Figura 37 ilustra as 8 imagens nas quais os pixels representam as informações térmicas de uma câmera térmica. A paleta de cores mostrada no topo de cada imagem foi determinada automaticamente pelo software da câmera. A temperatura ambiente durante todas as capturas de imagens foi de 28 °C. Para os ventos quentes, as temperaturas no anteparo variaram de 35 °C a 32 °C com a distância de emissão, enquanto para os ventos frios a variação foi de 25° C a 27 °C.

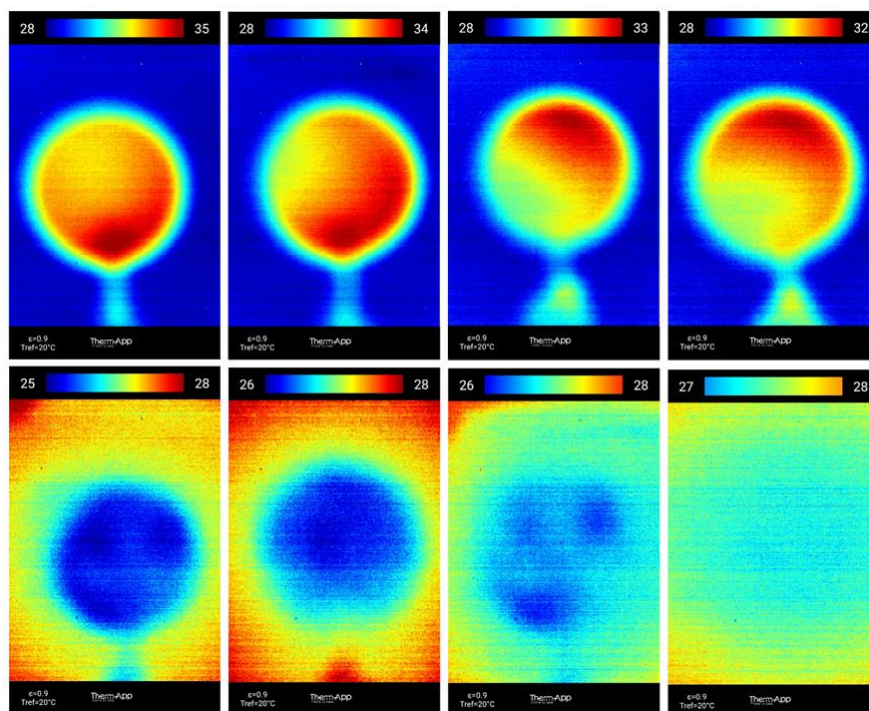


Figura 37 - Imagens térmicas exibindo a variação da temperatura em função da distância do anteparo. Os ventos aquecidos (parte superior) e os ventos resfriados (parte inferior) são projetados contra o anteparo a 15, 45, 75 e 100 cm (da esquerda para a direita). Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5 ANÁLISE DA PESQUISA SOBRE ACEITAÇÃO, COMPREENSÃO E IMERSÃO DOS USUÁRIOS

5.5.1 *User Experience Questionnaire* (UEQ-S)

Para estimar a confiabilidade da pesquisa, o coeficiente alfa de Cronbach foi calculado e teve um resultado razoavelmente alto. O coeficiente alfa de Cronbach, que é a correlação entre respostas em um questionário através da análise das respostas dadas pelos respondentes, foi de 0,72 para os itens da qualidade pragmática e 0,89 para qualidade hedônica. As respostas apresentaram avaliação positiva com valores médios para qualidade pragmática = 1,471 e qualidade hedônica = 1,535, enquanto a qualidade geral = 1,503 (médias e desvios padrão para cada item são fornecidos na Tabela 5). Usando o *benchmark* fornecido pelo UEQ [61], que contém dados de outros projetos, é possível perceber que o *Twirl* está acima da média para qualidade hedônica e pragmática (apenas 25% dos resultados no *benchmark* são melhores do que o resultado de *Twirl* e 50% resultados são piores) e bons para a qualidade geral (resultados de 10% do *benchmark* são melhores e os resultados de 75% são piores).

Item	Média	Desvio Padrão
Restritivo-Útil	1,605	1,348
Complicado-Fácil	1,558	1,351
Eficiente-Ineficiente	1,186	1,484
Autoexplicativo-Confuso	1,535	1,386
Emocionante-Entediante	1,372	1,496
Interessante-Desinteressante	1,651	1,446
Inovador-Conservador	1,721	1,403
Pioneiro-Ordinário	1,395	1,312

Tabela 5 - Médias e Desvio Padrão Obtidos pelo *Twirl* para Cada Item UEQ-S. Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5.2 *Virtual Reality Hardware Acceptance Model* (VR-HAM)

As respostas revelaram que os entrevistados foram neutros em relação à utilidade do *Twirl* (Figura 38). No entanto, em média, os participantes acharam que o *Twirl* é fácil de usar (Figura 39). Esses resultados evidenciam uma baixa oferta de mídias capazes de interagir com

o sistema. Para aumentar a utilidade de sistemas como o *Twirl*, mais conteúdos relativos a tais sistemas devem ser desenvolvidos. Neste sentido, foi solicitado aos entrevistados que avaliassem a utilidade do *Twirl* em várias possíveis aplicações (Figura 42). Isso revelou que jogos e treinamentos são as áreas que mais poderiam se beneficiar com o aproveitamento dessa tecnologia. Além disso, altas percepções de prazer foram registradas (Figura 41). Com base nas observações de Manis et al. [56], o prazer percebido aparece como o principal preditor da intenção de uso futuro. Isso é confirmado pelos resultados apresentados na Figura 40, que mostraram um maior interesse em usar *Twirl* no futuro.

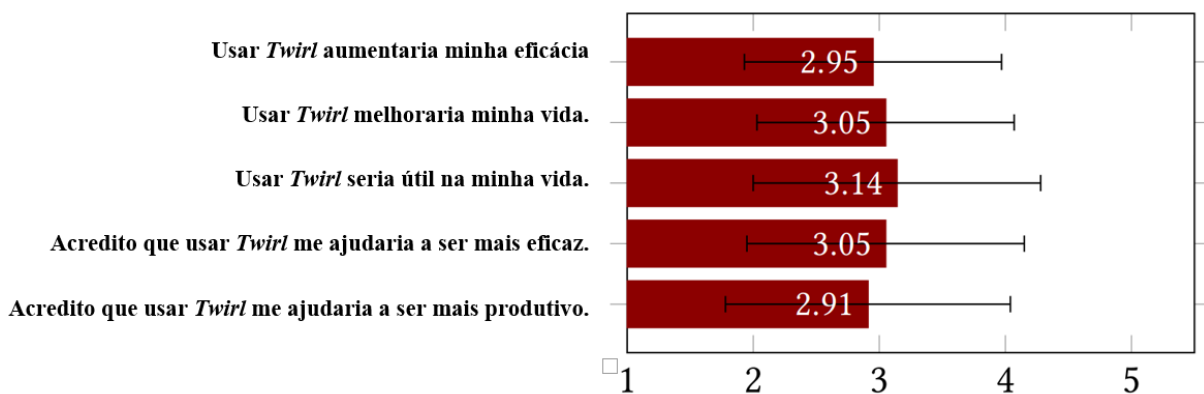


Figura 38 - Pontuações para utilidade percebida para o *Twirl* (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.

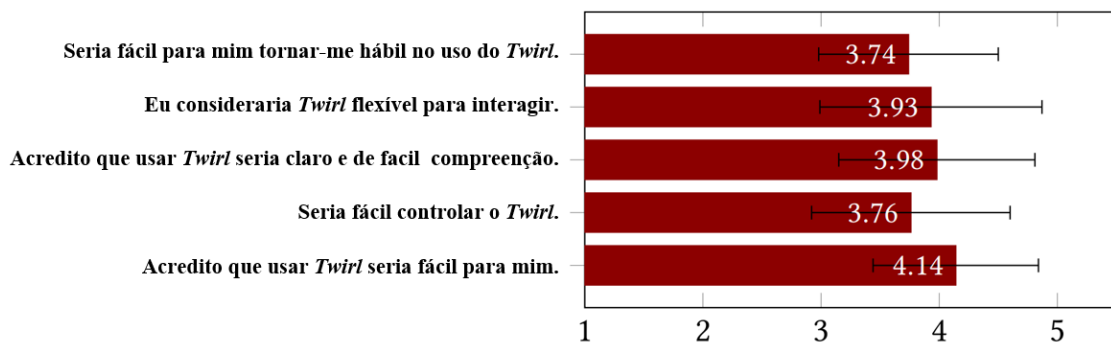


Figura 39 - Pontuações para facilidade de uso percebida para o *Twirl* (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.

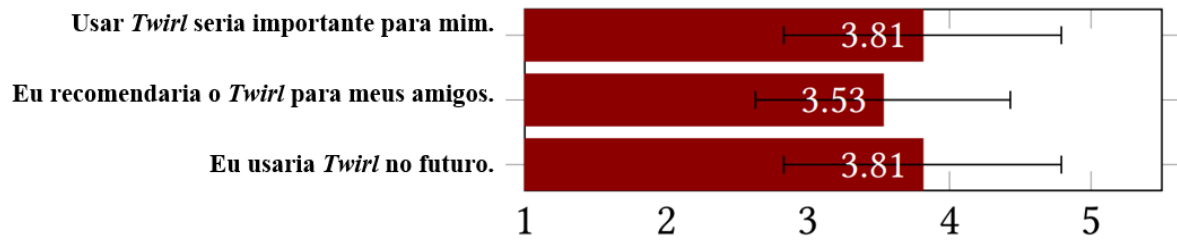


Figura 40 - Pontuações para intenção de usar o *Twirl* (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.

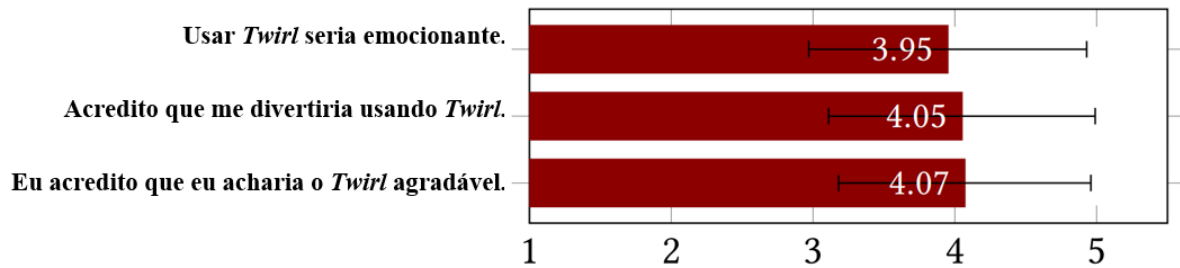


Figura 41 - Pontuações para prazer percebido ao usar *Twirl* (VR-HAM). Fonte: Elaborada pelo autor.

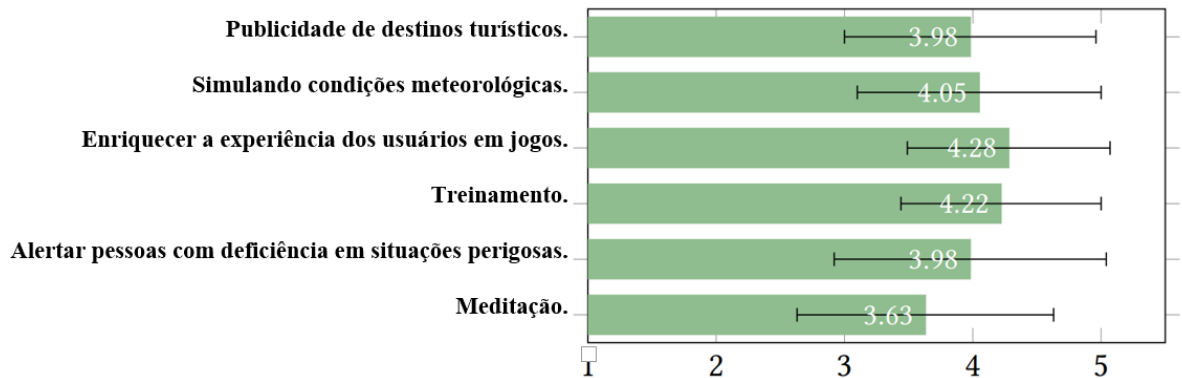


Figura 42 - Pontuações para a imersão do *Twirl* (TPI). Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5.3 *The Temple Presence Inventory* (TPI)

As médias das respostas para essas perguntas variaram entre 5,09 e 5,56, enfatizando a percepção dos usuários para o *Twirl* como envolvente e imersivo (Figura 43).

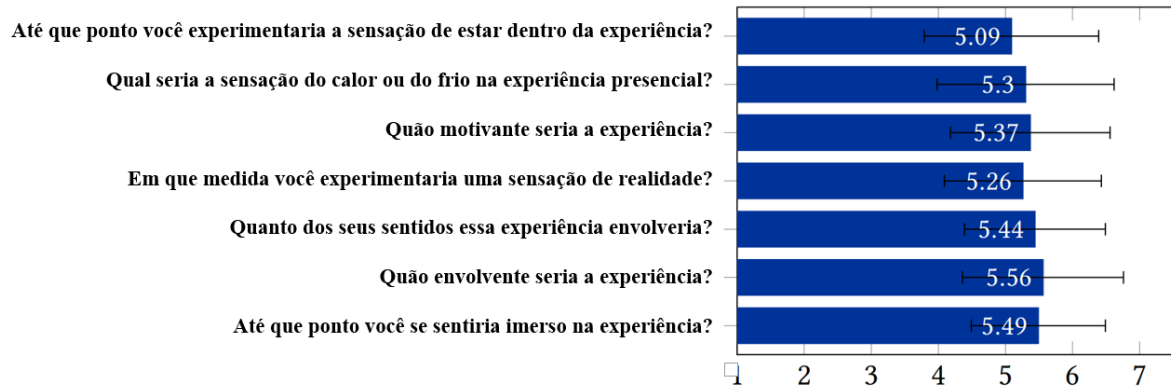


Figura 43 - Pontuações para as utilidades do *Twirl* em algumas aplicações. Fonte: Elaborada pelo autor.

5.6 DISCUSSÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesta seção, será feita uma discussão sobre as conclusões das investigações feitas ao longo das análises. Além disso, serão apresentados os aspectos e as limitações que os desenvolvedores devem considerar ao criar experiências imersivas de ventos aquecidos ou resfriados.

Ao contrário dos sistemas que fornecem ventos e estímulos térmicos separadamente [25] ou aqueles que se concentram em um único tipo de efeitos térmico no vento (por exemplo, vento aquecido) [62] [63], o *Twirl* integra mecanismos de aquecimento e resfriamento dentro dos ventiladores. Isso estabelece as premissas para uma experiência mais precisa que simula as condições ambientais. No entanto, deve-se considerar a alta complexidade de construir um dispositivo para produzir e distribuir fluxos de ar quentes e frios. Isso se deve a questões relacionadas aos fenômenos físicos envolvidos e ao tempo de transição entre os efeitos do fluxo de ar quente e frio, que devem ser cuidadosamente analisados pelos projetistas de tais experiências.

Os testes mostraram que com o *Twirl* é possível atingir uma queda média de 2 °C em 30s e um aumento de 10 °C no mesmo período de tempo. Para atingir as temperaturas desejadas, de acordo com as anotações, vários fatores, como o tempo de resposta, duração da apresentação e a temperatura esperada do cenário, devem ser cuidadosamente considerados. Além disso, foi possível constatar a dificuldade em se manter o fluxo de ar em uma temperatura constante. Os efeitos térmicos tendem a ser dissipados pelo fluxo de ar após um tempo. Mecanismos para regular a potência podem ajudar e devem ser considerados.

A conversão da energia elétrica em calor é um processo muito mais simples do que o inverso, para remover calor do meio. Por exemplo, o secador de cabelo, trabalhando com um quarto de sua potência máxima (300W), é mais eficiente do que os elementos Peltier (144 W), que obteve uma variação na temperatura cinco vezes menor. Portanto, é possível concluir que a construção de um dispositivo de vento aquecido é mais simples que o contrário. Além disso, se for considerado o atraso necessário para preparar o dispositivo de fluxo de ar resfriado - por exemplo, o reservatório de água precisa ser resfriado antes da liberação do efeito desejado - é possível concluir que há a necessidade de evoluir na criação desses dispositivos, a fim de integrá-los de forma eficiente e harmoniosa às experiências de mídia.

A sincronização entre as anotações de vídeo e os efeitos também devem ser cuidadosamente planejadas, visto que existe um atraso natural para a produção e entrega dos ventos aquecidos ou resfriados. Isto devido, principalmente, à inércia e ao tempo de resposta dos ventiladores ao serem acionados. No entanto, estudos experimentais são necessários para investigar se os usuários poderiam ignorar essas desvantagens, como no caso dos efeitos olfativos em multimídia [64], no qual mostrou que os participantes eram tolerantes aos efeitos de interferência e distorção causados por estímulos olfatórios.

Embora a pesquisa de aceitação e compreensão dos usuários tenha revelado que os entrevistados consideram o conteúdo enriquecido com ventos aquecidos e resfriados como realistas e imersivos, novos experimentos são necessários para ampliar esta pesquisa para além da busca por realismo. Como a sensação de imersão é um produto da mente, não está claro qual é o peso dos diferentes fatores que provavelmente desempenharão um papel para uma melhor experiência.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi apresentado e analisado o *Twirl*, um sistema que permite a criação de ventos aquecidos e resfriados sincronizados a conteúdos multemídia, com o objetivo de enriquecer a experiência e a imersão do usuário. Tal sistema, que opera com uso de secadores de cabelo e através da vaporização de água resfriada por pastilhas Peltier, permitiu a análise do processo de aquecimento e resfriamento dos ventos, e forneceu subsídios para a criação de anotações sincronizadas de efeitos sensoriais para ventos com uma abordagem térmica. A sincronização de três vídeos diferentes anotados com efeitos sensoriais foi avaliada.

Além disso, foram descritos o processo de construção, o controle e os componentes do *Twirl*. Os resultados dos testes mostraram os atrasos necessários para que os efeitos térmicos desejados fossem sincronizados com os vídeos. Neste sentido, recomendações foram feitas para o desenvolvimento e implantação de experiências audiovisuais aprimoradas com efeitos de vento aquecidos ou resfriados.

A literatura, investigada no capítulo 2, aponta diferentes soluções inovadoras para o fornecimento de estímulos térmicos ou estímulos táteis por meio de fluxo de ar. No entanto, não há investigação que integre esses dois tipos de efeitos sensoriais em uma mesma plataforma. O *Twirl* não é somente um dispositivo térmico, e também não é um dispositivo de vento, apenas - é um dispositivo capaz de produzir fluxos de ar tanto aquecidos quanto resfriados. Nesta questão, reside sua singularidade e diferenciação em relação a pesquisas anteriores.

A escalabilidade da solução, na qual é possível aumentar o número de dispositivos de forma bastante simples, permite a adição de novos pontos de vento. Conforme observado por Tolley et al. em *WindyWall* [31], a escalabilidade é importante em cenários nos quais se deseja potencializar os ventos. Aumentar ou diminuir a escala produz variações na intensidade dos efeitos do fluxo de ar e, além disso, também pode resultar em aumentos na velocidade de variação da temperatura, sem mencionar a possibilidade, se necessário, de combater os efeitos dissipatórios e manter as temperaturas constantes por mais tempo. Nesse sentido, o dimensionamento não deve ser entendido apenas como uma solução para o aumento da intensidade das grandezas físicas, mas também como uma forma de oferecer direcionalidade para o efeito do fluxo de ar, e propiciar, por exemplo, a criação de ventos em 360° aquecidos e resfriados.

A adaptação dos dispositivos para uma experiência vestível, isto é, integrado com óculos de realidade virtual, é uma questão a ser analisada. Embora uma abordagem seja mais invasiva que a outra, isso deve ser investigado na prática, buscando as preferências dos usuários por um ou outro tipo de dispositivo. Este é, de fato, um dos motivadores que justificam a pesquisa, na Seção 4.2.5, que objetiva investigar a aceitação e a compreensão dos usuários.

Além disso, embora o *Twirl* seja atualmente não vestível, no futuro é provável que ele seja adaptado para dispositivos vestíveis, como HMDs para experiências de RV. No entanto, utilizar o mesmo hardware seria difícil e bastante desafiador porque, a névoa, para não condensar em água, deve percorrer um caminho mais retilíneo possível e com um mínimo de obstáculos. Por outro lado, a abordagem atual pode ser facilmente usada para estender o número desses dispositivos no ambiente do usuário, uma vez que possui um baixo custo de construção. Isso permitiria a criação de paredes de ventos com uma abordagem térmica e experiências em 360°, aumentando a sensação de imersão dos usuários nas experiências integradas a conteúdos multimídias.

Como já observado, a aceitação e a compreensão são fatores cruciais para avaliação de equipamentos tecnológicos. Portanto, é importante determinar em qual lugar na curva *Hype Cycle* [65] uma inovação tecnológica específica pode se encontrar. Neste sentido, a pesquisa descrita na Seção 4.2.5 foi conduzida e destacou amplamente, e talvez sem surpresa, as expectativas positivas dos usuários em relação aos efeitos produzidos pelo *Twirl*. No entanto, trabalhos futuros precisam explorar profundamente a dinâmica da tecnologia de ventos aquecidos e resfriados para delinear mais claramente seu potencial.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

É importante ressaltar que, além das melhorias para o sistema já mencionadas, outras devem ser feitas, em especial a redução do tempo necessário para que a água atinja a temperatura de operação. Além disso, o *Twirl* deve ser submetido a testes de qualidade da experiência do usuário (QoE) para medir o grau de satisfação dos usuários ao utilizar o sistema.

Na maioria dos ambientes a coleta da temperatura é bastante simples; no entanto, tal facilidade não se aplica ao entendimento da percepção de temperatura pelos usuários. Assim,

não é possível garantir que a sensação de temperatura entregue aos usuários seja a mesma que a temperatura medida. Portanto, experimentos devem ser conduzidos para explorar a experiência psicofísica do fluxo de ar enquanto se assiste a cenas congruentes aos efeitos sensoriais apropriados.

Devido à pandemia COVID -19 e ao distanciamento social, não foi possível realizar estes experimentos com usuários, deixando para trabalhos futuros realizarem tais investigações. No entanto, esses experimentos já foram planejados. A seguir será apresentada a metodologia do experimento para medir a influência na QoE dos ventos com temperatura controlada.

Desta forma, inicialmente, 36 usuários serão convidados para participar do experimento. A investigação usará uma estratégia do tipo dentro do grupo (Within-group design) [66] na qual cada participante será exposto a todas as situações possíveis de funcionamento do sistema analisado, mantendo-se uma única variável independente em todas elas. A vantagem dessa estratégia é que o tamanho da amostra pode ser menor, reduzindo assim o custo do experimento. Cada usuário assistirá aos três vídeos apresentados na Seção 4.1.2, quais sejam: Bardarbunga, Sandboarding, Snowboarding. Além disso, dois tipos de questionários serão utilizados: o questionário QoE, que objetiva mensurar o grau de satisfação ou aborrecimento do usuário na utilização dos efeitos multissensoriais sincronizados ao conteúdo audiovisual apresentado e o questionário UEQ, que visa medir a experiência do usuário na utilização dos equipamentos produtores de fluxo de ar, já apresentado e utilizado na Seção 4.2.5.

6.1.1 Design do Experimento

Será necessária a utilização do delineamento experimental, no qual manipula-se uma variável chamada de variável independente para ver qual efeito ela tem sobre outra variável, chamada de variável dependente. Além disso, o delineamento deverá ser do tipo intraparticipantes, em que cada participante atuará sob todas as condições no estudo.

A variável independente manipulada deverá ser a sensação térmica provocada por um fluxo de ar direcionado ao usuário (com dois níveis: aquecido e resfriado). As variáveis dependentes, denominadas, de forma ampla, de QoE e UEQ, serão obtidas através da aplicação dos questionários. Efeitos de ordem são uma consequência dos delineamentos

intraparticipantes, no qual completar as condições em uma ordem específica leva a diferenças na variável dependente, não sendo resultado da manipulação da variável independente.

Com a finalidade de mitigar os efeitos de ordem de apresentação, os vídeos serão apresentados de forma que sua sequência varie ciclicamente, delineado em quadrado latino 3x3. Assim, o número de vezes que cada vídeo será visto na primeira, segunda ou terceira posição será exatamente o mesmo para todos os vídeos. Além disso, é necessário considerar a ordem com que os vídeos com e sem os efeitos térmicos nos ventos serão apresentados. A apresentação dos videoclipes deverá ser variada conforme Tabela 6.

	1º Vídeo		2º Vídeo		3º Vídeo	
1	BARDARBUNGA		SNOWBOARDING		SANDBOARDING	
	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito
2	SNOWBOARDING		SANDBOARDING		BARDARBUNGA	
	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito
3	SANDBOARDING		BARDARBUNGA		SNOWBOARDING	
	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito
4	BARDARBUNGA		SNOWBOARDING		SANDBOARDING	
	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito
5	SNOWBOARDING		SANDBOARDING		BARDARBUNGA	
	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito
6	SANDBOARDING		BARDARBUNGA		SNOWBOARDING	
	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito	Sem efeito	Com efeito

Tabela 6 - Ordem de Apresentação dos Vídeos. Fonte: Elaborada pelo autor.

Os passos realizados durante todas as fases do experimento foram demarcados pelo framework DECIDE proposto por Sharp et al. [67]. O DECIDE orienta o planejamento, a execução e a análise de uma avaliação de IHC. As atividades do framework são interligadas e executadas iterativamente à medida que o avaliador articula os objetivos da avaliação, os dados e recursos disponíveis. O acrônimo D.E.C.I.D.E significa: D – Determinar as metas do teste; E – Explorar as questões a serem respondidas; C – Escolher o paradigma de teste; I – Identificar questões práticas; D – Decidir como lidar com questões éticas; E – Avaliar, analisar e apresentar dados.

6.1.2 Procedimento do Experimento

Os participantes serão recebidos na sala experimental e, na sequência, serão instruídos sobre o objetivo do experimento e perguntados sobre alguma dúvida. Então, será

solicitado que se sentem em frente ao monitor, estando alinhados corretamente com os equipamentos de vento. Cada vídeo será reproduzido duas vezes: uma com anotações para estímulos tácteis-térmicos por meio dos ventos e outra com anotações para estímulos tácteis por meio de ventos em temperatura ambiente. Após assistir a cada videoclipe, os participantes preencherão o questionário de QoE. Ao final do experimento, também serão coletadas opiniões sobre os equipamentos produtores de ventos quentes e sobre os equipamentos produtores de ventos frios, através do questionário UEQ.

6.1.3 Questionários

O Questionário UEQ, que em sua versão curta (UEQ-S) foi apresentado na Seção 4.2.5, visa mensurar a experiência do usuário em produtos interativos.

O questionário de QoE é composto por treze perguntas direcionadas à experiência do usuário. Para cada vídeo, que será assistido com e sem efeitos, os participantes deverão responder às trezes perguntas. As perguntas estão divididas em três grupos. O grupo A, que contém apenas uma pergunta, avalia a qualidade geral do vídeo. O grupo B, com seis perguntas, afere a experiência com os ventos e sua influência térmica. Por fim, o grupo C, com quatro questões, mede a experiência com os ventos e sem a influência térmica. A resposta para cada pergunta está expressa em uma escala Likert de 5 pontos, conforme detalhado abaixo (Tabela 7).

(A1)Avalie a qualidade geral do videoclipe.	<i>{Péssima, Ruim, Neutra, Boa, Excelente}</i>
(B1)O efeito do vento térmico foi liberado:	<i>{Muito cedo, Cedo, No momento oportuno, Atrasado, Muito Atrasado}</i>
(B2)Como você classificaria a temperatura dos efeitos do vento térmico?	<i>{Muito mais frio que o esperado, Mais frio que o esperado, Na medida certa, Mais quente que o esperado, Muito mais quente que o esperado}</i>
(B3)Os efeitos de vento térmico melhoram a sensação de realidade.	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo plenamente}</i>
(B4)Os efeitos de vento térmico são distrativos.	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo plenamente}</i>
(B5)Os efeitos de vento térmico são irritantes.	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo plenamente}</i>
(B6)Eu gostei de assistir ao vídeo com efeitos de vento térmico	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo plenamente}</i>
(C1)Os efeitos de vento melhoram a sensação de realidade.	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo plenamente}</i>
(C2)Os efeitos de vento são distrativos.	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro,</i>

	<i>Concordo, Concordo plenamente</i>
(C3)Os efeitos de vento são irritantes.	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo plenamente}</i>
(C4)Eu gostei de assistir ao vídeo com efeitos de vento	<i>{Discordo totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo plenamente}</i>

Tabela 7 - Questionário QoE. Fonte: Elaborada pelo autor.

6.1.4 Análise dos Resultados

As respostas, compostas pelos 5 itens da escala Likert do questionário QoE, descrito na Seção 6.1.3, serão mapeadas para os valores numéricos de 1 a 5 para fins de análise estatística. Na sequência, será utilizado o teste t para amostras pareadas com o objetivo de verificar um possível aumento entre a diferença das médias dos dois cenários, quais sejam: com e sem a influência térmica nos ventos. Dessa forma, será realizado o teste da seguinte hipótese:

$$H_0: \mu(\text{com efeito}) = \mu(\text{sem efeito})$$

$$H_A: \mu(\text{com efeito}) > \mu(\text{sem efeito})$$

Por fim, será possível verificar a influência dos ventos aquecidos ou resfriados na qualidade de experiência (QoE) dos usuários que assistiram os vídeos sincronizados com estes efeitos sensoriais.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Ghinea, C. Timmerer, W. Lin e S. R. Gulliver, “Mulsemmedia: State of the Art, Perspectives, and Challenges,” em *ACM Trans. Multimedia Comput.*, 2014.
- [2] Philips, “Philips amBX Gaming PC peripherals SGC5103BD Premium kit,” Philips, [Online]. Available: <https://philips.to/35tvRzF>. [Acesso em 10 September 2019].
- [3] M. Rheiner, “Birdly an attempt to fly,” em *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies on - SIGGRAPH '14*. ACM Press, 2014.
- [4] E. Shaw, T. Roper, T. Nilsson, G. Lawson, S. Cobb e D. Miller, “The Heat is On: Exploring User Behaviour in a Multisensory Virtual Environment for Fire Evacuation,” em *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)*, 2019.
- [5] S. Cardin, D. Thalmann e F. Vexo, “Head mounted wind,” em *proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007)*, 2007.
- [6] R. Stone, R. Guest, P. Mahoney e D. & G. C. Lamb, “A ‘mixed reality’ simulator concept for future Medical Emergency Response Team training,” em *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 2017.
- [7] A. Covaci, G. Ghinea, C.-H. Lin, S.-H. Huang e J.-L. Shih, “Multisensory games-based learning - lessons learnt from olfactory enhancement of a digital board game.,” em *Multimedia Tools and Applications*, 2018.
- [8] C. Claisse, D. Petrelli, N. Dulake, M. Marshall e L. Ciolfi, “Multisensory interactive storytelling to augment the visit of a historical house museum,” em *Proceedings of the 2018 Digital Heritage International Congress*, 2018.
- [9] O. Petit, C. Velasco e C. Spence, “Digital sensory marketing: Integrating new technologies into multisensory online experience,” em *Journal of Interactive Marketing*, 2019.
- [10] Y. Sulema, “Mulsemmedia vs. Multimedia: State of the art and future trends,” em *2016 International Conference on Systems, Signals and Image Processing* , 2016.
- [11] E. B. Saleme e C. A. S. Santos, “PlaySEM: A Platform for Rendering MulSeMedia Compatible with MPEG-V,” em *Proceedings of the 21st Brazilian Symposium on*

Multimedia and the Web, 2015.

- [12] M. Waltl, C. Timmerer e H. Hellwagner, “Improving the Quality of multimedia Experience through sensory effects,” em *2nd International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX’10)*, 2010.
- [13] E. B. Saleme, C. A. S. Santos, R. A. Falbo, G. Ghinea e F. Andres, “MulseOnto: a Reference Ontology to Support the Design of Mulsemedia Systems,” *Journal of Universal Computer Science*, p. 1761–1786, 12 2019.
- [14] E. B. Saleme, A. Covaci, G. Mesfin, C. A. S. Santos e G. Ghinea, “Mulsemedia DIY: A Survey of Devices and a Tutorial for Building Your Own Mulsemedia Environment,” *ACM Comput. Surv.*, 06 2019.
- [15] B. Rainer, M. Waltl, E. Cheng, M. Shujau, C. Timmerer, S. Davis, I. Burnett, C. Ritz e a. H. Hellwagner, “Investigating the impact of sensory effects on the Quality of Experience and emotional response in web videos,” em *2012 Fourth International Workshop on Quality of Multimedia Experience*, 2012.
- [16] E. B. Saleme, “A Conceptual Architecture and a Framework for Dealing with Variability in Mulsemedia Systems,” *Ph.D. Dissertation. Federal University of Espírito Santo*, 2019.
- [17] E. B. Saleme, C. A. Santos e G. Ghinea, “A Mulsemedia Framework for Delivering Sensory Effects to Heterogeneous Systems,” *Multimedia Syst*, p. 421–447, 08 2019.
- [18] R. Abreu, D. Mattos, J. A. F. d. Santos e D. C. Muchaluat-Saade, “Semi-automatic synchronization of sensory effects in mulsemedia authoring tools,” em *Proceedings of the 25th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web*, 2019.
- [19] B. E. Ries, *Sensação e percepção. Psicologia e Educação: fundamentos e reflexões*, 2004.
- [20] T. M. Kim e G. J., “Design and evaluation of a wind display for virtual reality,” *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, 2004.
- [21] H. Matsukura, T. Nihei e H. Ishida, “Multi-sensorial field display: Presenting spatial distribution of airflow and odor,” em *IEEE Virtual Reality Conference*, 2011.
- [22] M. Feng, R. W. Lindeman, H. Abdel-Moati e J. C. Lindeman, “Haptic ChairIO: A system to study the effect of wind and floor vibration feedback on spatial orientation in VEs,” em *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 2015.

- [23] M. Waltl, B. Rainer, C. Timmerer e H. Hellwagner, “An end-to-end tool chain for Sensory Experience based on MPEG-V,” em *Signal Processing: Image Communication*, 2013.
- [24] M. Waltl, C. Timmerer, B. Rainer e H. Hellwagner, “Sensory effect dataset and test setups,” em *2012 Fourth International Workshop on Quality of Multimedia Experience. IEEE*, 2012.
- [25] N. Ranasinghe, P. Jain, S. Karwita, D. Tolley e E. Y. Do, “Ambiotherm,” em *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017.
- [26] N. Ranasinghe, P. Jain, N. T. N. Tram, D. Tolley, Y. Liangkun, C. E. W. Tung, C. C. Yen, E. Y.-L. Do, K. C. R. Koh e K. Shamaiah, “A Demonstration of Season Traveller,” em *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM*, 2018.
- [27] R. Peiris, W. Peng, Z. Chen, L. Chan e K. Minamizawa, “Thermovr: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays,” em *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 5452–5456. CHI '17, ACM*, 2017.
- [28] A. Wilberz, D. Leschtschow, C. Trepkowski, J. Maiero, E. Kruijff e B. Riecke, “FaceHaptics: Robot Arm based Versatile Facial Haptics for Immersive Environments,” em *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*, 2020.
- [29] I. Comşa, E. B. Saleme, A. Covaci, G. M. Assres, R. Trestian, C. A. S. Santos e G. Ghinea, “Do I Smell Coffee? The Tale of a 360° Mulsemmedia Experience,” em *IEEE MultiMedia*, 2020.
- [30] A. Covaci, R. Trestian, E. B. Saleme, I.-S. Comsa, G. Assres, C. A. S. Santos e G. Ghinea, “360° Mulsemmedia: A Way to Improve Subjective QoE in 360° Videos,” em *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*, 2019.
- [31] D. Tolley, T. N. T. Nguyen, A. Tang, N. Ranasinghe, K. Kawauchi e C. C. Yen, “WindyWall,” em *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. ACM.*, 2019.
- [32] F. Hülsmann, N. Mattar, J. Fröhlich e I. Wachsmuth, “Simulating Wind and Warmth in

- Virtual Reality: Conception, Realization and Evaluation for a CAVE Environment,” *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 2014.
- [33] P.-H. Han, Y.-S. Chen, K.-C. Lee, H.-C. Wang, C.-E. Hsieh, J.-C. Hsiao, C.-H. Chou e Y.-P. Hung, “Haptic around: multiple tactile sensations for immersive environment and interaction in virtual reality,” em *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '18)*, 2018.
- [34] P.-H. Han, Y.-S. Chen, C.-E. Hsieh, H.-C. Wang e Y.-P. Hung, “Hapmosphere: Simulating the Weathers for Walking Around in Immersive Environment with Haptics Feedback,” em *IEEE World Haptics Conference*, 2019.
- [35] D. Narciso, M. Melo, J. Vasconcelos-Raposo e M. Bessa, “The Impact of Olfactory and Wind Stimuli on 360 Videos Using Headmounted Displays,” em *ACM Transactions on Applied Perception*, 2020.
- [36] P. Ke, K.-N. Keng, S. Jiang, S. Cai, Z. Rong e K. Zhu, “Embodied Weather: Promoting Public Understanding of Extreme Weather Through Immersive Multi-Sensory Virtual Reality,” em *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry (VRCAI '19)*, 2019.
- [37] R. Wettach, C. Behrens, A. Danielsson e T. Ness, “A thermal information display for mobile applications,” em *Proceedings of the 9th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services (MobileHCI '07)*, 2007.
- [38] A. E. Ali, X. Yang, S. Ananthanarayan, T. Röggl, J. Jansen, J. Hartcher-O'Brien, K. Jansen e P. Cesar, “ThermalWear: Exploring Wearable On-chest Thermal Displays to Augment Voice Messages with Affect,” em *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*, 2020.
- [39] R. L. Peiris, Y.-L. Feng, L. Chan e K. Minamizawa, “ThermalBracelet,” em *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*. ACM Press, 2019.
- [40] M. Nakatani, K. Sato, K. Sato, Y. Kawana, D. Takai, K. Minamizawa e S. Tachi, “A Novel Multimodal Tactile Module that Can Provide Vibro-Thermal Feedback,” em *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2017.
- [41] N. Soucy, N. Ranasinghe, A. Rossow, M. James e R. Peiris, “THED: A Wrist-Worn Thermal Display to Perceive Spatial Thermal Sensations in Virtual Reality,” em

- Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC)*, 2020.
- [42] S. Kim, Y.-k. Row e T.-J. Nam, “Thermal Interaction with a Voice-based Intelligent Agent,” em *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '18)*, 2018.
- [43] G. Wilson, M. Halvey, S. A. Brewster e S. A. Hughes, “Some like It Hot: Thermal Feedback for Mobile Devices,” em *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* , 2011.
- [44] A. Nijijima, T. Takeda, T. Mukouchi e T. Satou, “ThermalBitDisplay: Haptic Display Providing Thermal Feedback Perceived Differently Depending on Body Parts,” em *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020.
- [45] J. Xu, Y. Kuroda, S. Yoshimoto e O. Oshiro, “Non-contact Cold Thermal Display by Controlling Low-temperature Air Flow Generated with Vortex Tube,” em *IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 2019.
- [46] M. Nakajima, Y. Makino e H. Shinoda, “Remote Cooling Sensation Presentation Controlling Mist in Midair,” em *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2020.
- [47] J. Brooks, S. Nagels e P. Lopes, “Trigeminal-Based Temperature Illusions,” em *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* , 2020.
- [48] Chambel, J. Ramalho e Teresa, “Windy sight surfers,” em *Proceedings of the 11th european conference on Interactive TV and video*, 2013.
- [49] T. Narumi, T. Akagawa, y. a. Seong e M. Hirose, “Characterizing the Space by Thermal Feedback through a Wearable Device,” em *International Conference on Virtual and Mixed Reality*, 2009.
- [50] E. Wnuk, J. M. d. Valk, J. L. A. Huisman e A. Majid, “Hot and Cold Smells: Odor-Temperature Associations across Cultures,” em *Frontiers in Psychology*, 2017.
- [51] N. Murray, O. A. Ademoye, G. Ghinea e G.-M. Muntean, “A tutorial for olfactionbased multisensorial media application design and evaluation,” em *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2017.
- [52] N. Murray, B. Lee, Y. Qiao e G.-M. Muntean, “Olfaction-enhanced multimedia: A

- survey of application domains, displays, and research challenges,” em *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2016.
- [53] K. Giering e I. Lamprecht, “Specific heat capacities of human and animal tissues,” em *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1996.
- [54] E. C. Rodrigues, E. B. Saleme, A. Covaci, C. A. S. Santos e G. Ghinea, “Blowing hot and cold: Enhancing multisensory experiences through temperature-controlled wind effects,” em *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. SUBMETIDO*, 2021.
- [55] M. Schrepp, A. Hinderks e J. Thomaschewski, Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S), *IJIMAI* 4, 6 (2017), 103–108, 2017.
- [56] K. T. Manis e D. Choi, “The virtual reality hardware acceptance model (VR-HAM): Extending and individuating the technology acceptance model (TAM) for virtual reality hardware,” em *Journal of Business Research* 100, 2019.
- [57] M. Lombard, T. B. Ditton e L. Weinstein, “Measuring presence: the temple presence inventory,” em *Proceedings of the 12th annual international workshop on presence*, 2009.
- [58] M. Schrepp, “User experience questionnaire handbook. All you need to know to apply the UEQ successfully in your project,” 2015.
- [59] L. A. Jones e M. Berris, “The psychophysics of temperature perception and thermal-interface design,” em *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2002.
- [60] BRASIL, “Norma Regulamentadora 17 - Ergonomia,” Brasília, 1990.
- [61] M. Schrepp, A. Hinderks e J. Thomaschewski, “Construction of a Benchmark for the User Experience Questionnaire (UEQ),” em *IJIMAI* 4, 4 (2017), 40–44, 2017.
- [62] Y. Ogiwara, M. Suzuki e A. Matsuura, “Windtherm Fire: An MR System for Experiencing Breathing Fire of a Dragon,” em *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 2020.
- [63] M. Suzuki e A. Matsuura, “Windtherm: A wearable VR device that provides temperature-controlled wind,” em *Virtual Reality International Conference Vric 2019 Proceedings*, 2019.

- [64] G. Ghinea e O. Ademoye, “The sweet smell of success: Enhancing multimedia applications with olfaction,” em *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 2012.
- [65] A. Linden e J. Fenn, Understanding Gartner’s hype cycles, Strategic Analysis Report N° R-20-1971. Gartner, Inc (2003), 2003.
- [66] J. Lazar, J. H. Feng e H. Hochheiser, *Research Methods in Human-Computer Interaction*, Morgan Kaufmann, 2017.
- [67] H. SHARP, Y. ROGERS e J. PREECE, *Interaction design: beyond human-computer interaction*, John Wiley & Sons, 2011.