



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Diseño e implementación de un dispositivo háptico tipo pantalla térmica para aplicaciones de realidad virtual con fines educativos y de entrenamiento

Design and implementation of a haptic thermal display device for virtual reality applications for education and in training purposes

Serrano-Pérez, E.*, Soberanes-Martín, A., Castro-San Agustín, J.R., Ávila-Aoki, M.

Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Valle de Chalco; C.P. 566615, México.
eserranop_s@uaemex.mx*; soberanesm@uaemex.mx; jcastros248@uaemex.mx; vlkmanuel@uaemex.mx

Innovación tecnológica: Display térmico con sistema de control difuso para realidad virtual.

Área de aplicación industrial: Capacitación con realidad virtual, Aulas y laboratorios de educación y entrenamiento.

Recibido: 23 abril 2023

Aceptado: 03 marzo 2024

Abstract

This work details the design and implementation of a thermal screen type device, focused on the presentation of information in the form of temperature. In this way, the user can perceive information when in contact with it and be used in virtual reality applications. The electronic control circuit, the design of a Sugeno-type fuzzy controller and the description of a virtual reality application developed in Unity for educational purposes are specified. The arrangement that allows returning to the initial operating condition by means of a network of cooling pipes by internal water circulation is described. The development is based on the premise of increasing realism in virtual reality applications by focusing the attention and focus of users during the learning process. As a result, the response curve to different temperature reference inputs is presented to evaluate the performance of the fuzzy controller. The dynamic temperature color scale is presented based on the temperature measurements made by the controller, providing thermal and visual information simultaneously through the device. Derived from the performance tests, the temperature-humidity haptic illusion was identified during the cooling stage, so in future work, further exploration of haptic illusions with virtual reality will be carried out.

Key words: Fuzzy control, Haptic, Human-Computer Interaction, Virtual reality.

Resumen

En este trabajo se detalla el diseño e implementación de un dispositivo de tipo pantalla térmica, enfocado en la presentación de información en forma de temperatura. De esta manera, el usuario puede percibir información al estar en contacto con el mismo y ser utilizado en aplicaciones de realidad virtual. Se especifica el circuito de control electrónico, el diseño de un controlador difuso tipo Sugeno, así como la descripción de una aplicación de realidad virtual desarrollada en Unity con fines didácticos. Se describe el arreglo que permite regresar a la condición inicial de operación, mediante una red de tuberías de enfriamiento por circulación interna de agua. El desarrollo se basa en la premisa de incrementar el realismo en aplicaciones de realidad virtual en virtud de focalizar la atención y enfoque de los usuarios durante el proceso de aprendizaje. Como resultados se presenta la curva de respuesta ante distintas entradas de referencia de temperatura, a fin de evaluar el desempeño del controlador difuso. Se presenta la escala dinámica de colores de temperatura en función de las mediciones de temperatura que realiza el controlador, proporcionando información térmica y visual de forma simultánea a través del dispositivo. Derivado de las pruebas de funcionamiento, se identificó la ilusión háptica temperatura-humedad durante la etapa de enfriamiento, por lo que en trabajos futuros se realizará una mayor exploración de ilusiones hápticas con realidad virtual.

Palabras clave: Control difuso, Háptico, Interacción hombre-computadora, Realidad virtual.

1. Introducción

La adopción de tecnologías como la realidad virtual y aumentada en los procesos de enseñanza y aprendizaje han mostrado un gran potencial educativo al permitirle a los estudiantes visualizar información gráfica relevante en un entorno que puede ser totalmente simulado (Zhou & Deng 2009), para el caso de la realidad virtual (VR) o con objetos virtuales superpuestos en la captura de una imagen real (Carmigniani & Furht 2011), como es el caso de la realidad aumentada (AR). En ambos casos, el despliegue de la información es a través de una pantalla que permite la visualización gráfica de texto, números y objetos de utilidad para los estudiantes en distintos contextos. Se han reportado aplicaciones en diversas áreas de estudio como la anatomía (Izard, Juanes Méndez, & Palomera 2017), las matemáticas (Buentello-Montoya, Lomelí-Plascencia, & Medina-Herrera 2021), la física (Neroni, Oti,

& Crilly 2021) o la enseñanza de idiomas (Cheng, Yang, & Andersen 2017).

A pesar de las bondades y ventajas que representan el uso de sistemas de realidad virtual y realidad aumentada en la educación y entrenamiento por sí solos, se requiere el desarrollo y uso de sistemas de retroalimentación háptica para incrementar el nivel de inmersión y realismo durante el uso de dichas tecnologías. Este proceso, está dando paso a la formación de un concepto actualmente denominado realidad extendida (XR), donde la percepción y retroalimentación del usuario es fundamental para incrementar el grado de inmersión y realismo durante el uso de aplicaciones de dichas tecnologías. De esta manera, es posible favorecer y vincular el uso de los distintos sentidos del ser humano, mejorando el enfoque y concentración en las tareas y actividades realizadas en los entornos virtuales que conllevan principalmente al

desarrollo de habilidades motrices, frecuentemente requeridas en diversas disciplinas prácticas, como la medicina (Collaço et al. 2021; Sapkaroski et al. 2018), la educación (Edwards et al. 2019; Richard et al. 2006; S. Lontschar et al. 2020) y áreas de la ingeniería (Grajewski et al. 2015; Noghabaei & Han 2021).

En el contexto de los países en vías de desarrollo, el uso de tecnologías educativas en aulas, laboratorios y salón de clases de universidades públicas se encuentra limitado por diversos factores. Por un lado, es difícil la asignación de recursos para la adquisición de dispositivos hápticos comerciales, aunado a una gran matrícula estudiantil que debe de cubrirse para que todos los alumnos tengan acceso al uso de la tecnología. Además, generalmente los dispositivos hápticos comerciales son de tecnología cerrada y presentan tanto poca adaptabilidad como poca flexibilidad para ser utilizados bajo distintos contextos educativos. Situaciones de emergencia como la pandemia de COVID-19 acentúan la necesidad de contar con una mayor cantidad de dispositivos hápticos por cada estudiante o usuario, a fin de limitar el compartir los dispositivos tangibles que promuevan la transmisión de virus y bacterias conservando el activo desarrollo de habilidades motrices y psicomotoras a través del uso del tacto (Motaharifar et al. 2021; Sanfilippo et al. 2022).

Dentro del área de los dispositivos hápticos, las pantallas térmicas han atraído la atención ya que permiten el despliegue de información en forma de la variable de temperatura. Uno de los objetivos de una pantalla térmica es simular o representar las situaciones cotidianas de la vida real que ocurren en los ambientes de realidad virtual y aumentada, lo que se traduce en un incremento tanto de realismo como de inmersión durante su uso. Diversos escenarios en el mundo real requieren del uso del tacto para conocer

información térmica y crear una mejor representación del entorno del ser humano a fin de poder tomar mejores decisiones. Los reportes en la literatura muestran que el desarrollo de pantallas térmicas se ha focalizado en el desarrollo de dispositivos de pequeña dimensión, o embebidos en textiles y guantes flexibles que focalizan su operación en pequeñas regiones y superficies de la piel (Gallo et al. 2015; Hirai & Miki 2019; Kim et al. 2020).

Por otro lado, el desarrollo de pantallas térmicas con mayor superficie de contacto ha sido menos abordado; sin embargo, existen una gran variedad de actividades de percepción térmica que se realizan en la vida cotidiana utilizando mayores regiones de contacto con la piel; generalmente vinculadas a la ejecución de acciones que se vinculan con la fuerza y presión del sistema locomotor humano. Algunos ejemplos son la verificación de la temperatura de una tubería en un motor de combustión interna, la manipulación de alimentos y bebidas con determinadas temperaturas, o la estimación de la fiebre al colocar la palma de la mano sobre la frente de una persona. Es decir, actividades que por su naturaleza requieran vincular la percepción de presión, peso o una mayor superficie de contacto entre los objetos que se manipulan y la temperatura de estos. En algunos casos, la vinculación de más sentidos da como resultado el surgimiento de ilusiones hápticas relacionadas con la temperatura (Carnahan, Dubrowski, & Grierson 2010; H. -N. Ho et al. 2019; Ho et al. 2014; Kuhtz-Buschbeck & Hagenkamp 2020; Trojan et al. 2018); situaciones interesantes que aún se encuentran por explorar en contextos como la realidad extendida.

En la actualidad, existe un incremento en el número de herramientas disponibles para implementar algoritmos de inteligencia artificial en hardware de bajo costo, por lo

que se han convertido en una alternativa accesible para el desarrollo de dispositivos de retroalimentación háptica. En este sentido, las tarjetas basadas en microcontrolador como Arduino y el gradual incremento de sensores, módulos de potencia y actuadores, han permitido el desarrollo de diversos recursos educativos en el pasado (F. Sanfilippo & K. Y. Pettersen 2015; J. J. Gil et al. 2014). En este sentido, el presente proyecto tiene el objetivo de desarrollar un dispositivo de retroalimentación háptica del tipo pantalla térmica para aplicaciones educativas y de entrenamiento con realidad virtual y/o aumentada; que resulte accesible, flexible y de bajo costo para ser replicado y adaptado por la comunidad académica del nivel superior. De esta manera, se ha contribuido al desarrollo de un dispositivo háptico del tipo pantalla térmica, controlado mediante técnicas de inteligencia artificial, como lo es el control difuso. El sistema puede ser replicable mediante dispositivos electrónicos de bajo costo, como la tarjeta con microcontrolador y los sensores y actuadores presentados. Este proceso facilita la comunicación con aplicaciones de realidad virtual, a fin de comunicar dispositivos externos que interactúan en tiempo real con los objetos dinámicos del ambiente virtual, proporcionando información háptica y visual simultáneamente al usuario.

El trabajo se estructuró con una introducción, donde se presenta la importancia de los sistemas de realidad virtual en la educación, además las oportunidades que presentan los sistemas hápticos como medio para incrementar la inmersión y el realismo. En este sentido, los sistemas de información en base a temperatura han sido poco explorados por lo que en la sección de métodos y materiales se detallan los procesos que permiten el desarrollo del dispositivo aquí presentado. Se brinda una descripción de los materiales, sensores y actuadores utilizados en la estructura electrónica y mecánica del

mismo. Se proporciona una descripción del funcionamiento de la aplicación de realidad virtual, donde se despliega en tiempo real una escala de colores dinámica en forma de termómetro visual para el usuario, que permite relacionar de forma física y visual la temperatura actual del dispositivo. Además, se brinda una descripción del sistema de control difuso de tipo Sugeno para regular la temperatura del dispositivo. En la sección de resultados y discusión se verifica el funcionamiento del sistema de control difuso mediante el software Matlab, obteniendo la curva de respuesta del controlador. Se realiza una descripción del funcionamiento del dispositivo al implementar el algoritmo con el software de Arduino, además se describe el sistema de enfriamiento mediante una tubería interna de agua que permitió la identificación de la ilusión háptica de humedad-temperatura. Finalmente, se presenta una sección de conclusiones donde se incluyen las perspectivas y trabajos a futuro por desarrollar.

2. Métodos y materiales

Se implementó un dispositivo de retroalimentación háptica del tipo pantalla térmica con una superficie de contacto cilíndrica utilizando un tubo de cobre estándar de $\frac{1}{2}$ pulgada comúnmente utilizado en las instalaciones hidráulicas residenciales. Se seleccionó el cobre, porque cuenta con una alta conductividad térmica y que facilita la propagación del calor (Lira-Cortés, González Rodríguez, & Méndez-Lango 2008). Se maquinaron 2 placas de cobre para soldar con estaño el tubo ubicado en el centro de estas, formando un arreglo que permitiera ubicar en cada una de las caras externas, una celda Peltier. A través de la regulación de la corriente eléctrica se puede controlar el calentamiento de las placas y consecuentemente el tubo de cobre a través del fenómeno de conducción, tal y como se

observa el detalle de la implementación en la Figura 1.

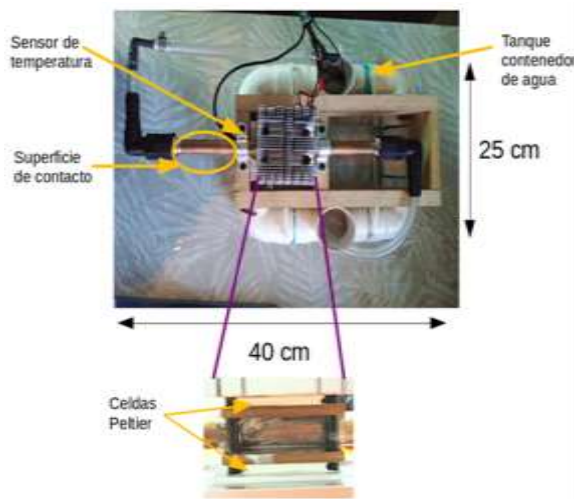


Figura 1. Esquema de representación del dispositivo de retroalimentación háptica del tipo pantalla térmica desarrollado con celdas Peltier.

Para acelerar el proceso de enfriamiento a fin de regresar el sistema a condiciones iniciales de operación con temperatura ambiente, se utilizó una microbomba de agua ubicada al interior de un tanque contenedor de PVC, con una capacidad de 1.5 litros de agua. En los extremos del tubo de cobre se soldaron conexiones roscadas para permitir la conexión de tubería y elementos de PVC para formar un circuito de enfriamiento interno por agua. Se fijó el arreglo de las celdas Peltier y el contenedor de agua mediante una estructura de madera, la cual además provee la altura necesaria para que el usuario pueda tocar y sujetar la superficie de contacto de manera libre. Se obtuvo una estructura compacta y con suficiente rigidez estructural para ser fácilmente transportada y ser utilizada sin presentar deformaciones o alteraciones en su funcionamiento.

El sistema electrónico consta como elemento principal, de una tarjeta basada en Arduino Nano, que utiliza 3 de sus entradas digitales, una para el sensor de temperatura digital DS18B20, el cual se alimentó de la fuente de

voltaje propia de una tarjeta Arduino Nano que suministra 5 volts de corriente directa. La salida de datos del sensor se conectó al pin digital D10 para realizar la captura de temperatura a través del protocolo de comunicación 1-wire, desarrollado por el fabricante Dallas Semiconductor (W. Jingzhuo & G. Chenglong 2007). Además, se utilizaron 2 microswitch como sistema de entrada de 2 bits, para seleccionar 4 puntos de consigna del controlador difuso. Se utilizaron los pines digitales D5 y D6 para la asignación de niveles lógicos monitoreados a través del programa escrito en lenguaje Arduino, a fin de poder seleccionar: 25 °C, 36 °C, 39 °C y 43 °C como entrada de referencia para el sistema de control. La selección de las temperaturas de referencia corresponde con los estados de temperatura corporal que presenta el ser humano (H. Sattar et al. 2019; Kuht & Farmery 2018). Como salida, la tarjeta basada en Arduino Nano únicamente considera el uso del pin digital D3, el cual puede ser utilizado como salida de tipo PWM. Para el manejo de la corriente eléctrica de 2 Celdas peltier conectas en paralelo tipo Tec1-12706, se utilizó un módulo Mosfet D4184 que permite manejar cargas de hasta 36 Volts y 15 Amperes a través de una señal de tipo PWM. Como fuente externa de alimentación para los elementos termoeléctricos se utilizó una fuente conmutada de 400 Watts que provee un voltaje constante de salida de 12 volts y hasta 20 Amperes, suficientes para la alimentación del arreglo de los actuadores. Al realizar pruebas preliminares, se obtuvo con un multímetro un consumo de corriente de las celdas, alrededor de 3 Amperes. El diagrama electrónico creado en Fritzing puede observarse en la Figura 2.

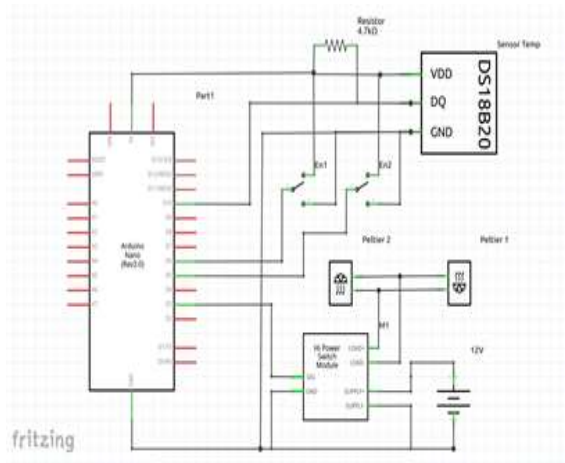


Figura 2. Diagrama electrónico del sistema.

Se utilizó el software Unity 2022.3.22 para desarrollar una aplicación de realidad virtual que muestra visualmente los estados de temperatura corporal a través de un arreglo rectangular que consta de 4 elementos cúbicos que cambian de color dependiendo de la temperatura presente en tiempo real del dispositivo de retroalimentación háptica del tipo pantalla térmica. Se añadió un script a los elementos cúbicos para habilitar la recepción de información entre la aplicación de realidad virtual en Unity y el microcontrolador a través del puerto serie. El microcontrolador envía información que permite modificar los colores de cada elemento cúbico dependiendo de la temperatura que mide el sensor en el dispositivo háptico. Cada elemento cúbico se

ilumina de un color en particular una vez que se inicia la aplicación y se habilita la transferencia de datos entre el microcontrolador y la aplicación. El primer cubo permitió definir el estado de “Hipotermia” en el ser humano, cuando la temperatura es menor o igual a 35 °C se ilumina de color azul y aparece el mensaje de la temperatura en color blanco. Cuando los cubos que representan los diferentes estados de las temperaturas corporales del ser humano están inactivos, se mantienen en color gris. A medida que se incrementa la temperatura, los siguientes cubos comienzan a iluminarse y se resalta en color blanco la temperatura en ese momento. Para un estado “Normal” el segundo cubo se ilumina en color verde y aparece el mensaje en color blanco cuando la temperatura es mayor a 35 °C y menor o igual a 37 °C, y para el tercer cubo correspondiente al estado de “Fiebre”, se ilumina de color rojo cuando la temperatura es mayor a 37 °C y menor o igual a 39 °C. Finalmente, el cubo que representa el estado de “Hiperpirexia” se ilumina en color negro cuando la temperatura es mayor o igual a 40 °C y menor o igual a 43 °C. Las distintas transiciones de colores respecto al correspondiente despliegue de información térmica se observan en la Figura 3.

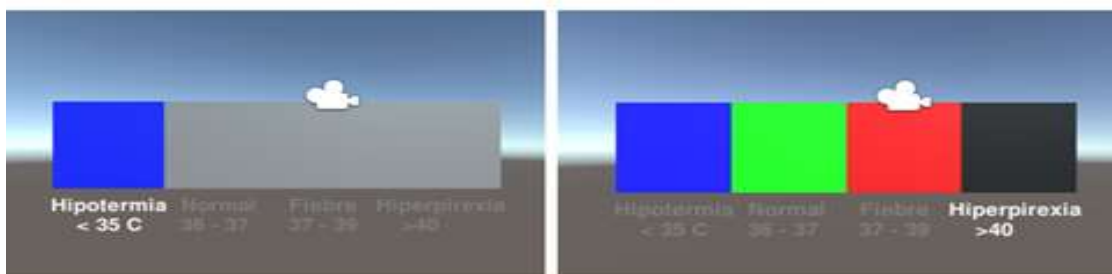


Figura 3. Aplicación de realidad virtual desarrollada en Unity.

El sistema de control difuso del tipo Sugeno, consta de una entrada denominada “Error” y una salida denominada “PWM”. Se diseñaron las funciones de membresía de la entrada de tipo triangular con el objetivo de minimizar la

variable de “Error” a fin de que, durante su operación, exista una tendencia a alcanzar el cero con respecto a la referencia de entrada. Para obtener el valor de error, se realiza la resta aritmética del punto de referencia con la

medición que realizar el sensor DS18B20 ubicado en contacto físico con la superficie exterior del tubo de cobre, cercano a la zona de contacto por el usuario. La función de membresía “muypequeño” se definió con los parámetros -1, 0 y 1. La función “pequeño” fue definida con los parámetros 0, 3 y 6. Por su parte, la función “medio” contiene los parámetros 3, 8 y 13. Además la función “grande” se definió con los parámetros 8, 15 y 22. Finalmente la función de membresía “muygrande” está definida con los parámetros 15, 25 y 35. De esta manera, el universo del discurso va de -1 a 35. La distribución de las funciones de membresía de la entrada “Error” se observa en la Figura 4.

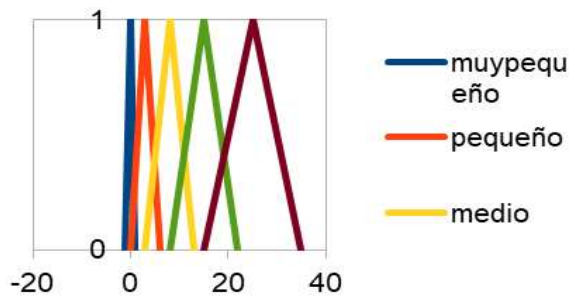


Figura 4. Descripción de las funciones de membresía de la variable de entrada “Error”.

La salida “PWM” consta de 5 constantes, definidas como “muybaja” con un parámetro de 70, una constante “baja” con un parámetro de 155, una constante “regular” con un parámetro de 195, una constante “alta” con 225; finalmente, una constante definida como “muyalta” a la que se le asignó un parámetro de 245, tal y como se observa en la Figura 5.

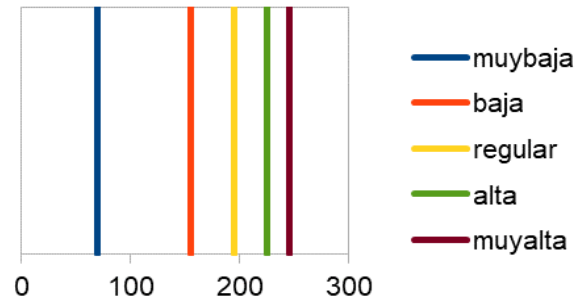


Figura 5. Descripción de las constantes de salida de la variable de salida “PWM”.

La base de reglas que permite representar el conocimiento para la toma de decisiones del controlador difuso tipo Sugeno, se implementó utilizando la estructura “Si... entonces...” tal y como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Base de reglas del controlador difuso de temperatura.

#	Regla con estructura “Si ... entonces ...”					
1.	Si	Error es	muypequeño	entonces	PWM es	muybaja
2.	Si	Error es	pequeño	entonces	PWM es	baja
3.	Si	Error es	medio	entonces	PWM es	regular
4.	Si	Error es	grande	entonces	PWM es	alta
5.	Si	Error es	muygrande	entonces	PWM es	muyalta

3. Resultados y discusión

Se implementó el sistema de control difuso tipo Sugeno a través del uso del software MATLAB, a fin de verificar el correcto funcionamiento de este. Resultó ser una importante herramienta de diseño para verificar y validar la implementación del

controlador a través del software Arduino, tal y como se observa en la Figura 6.

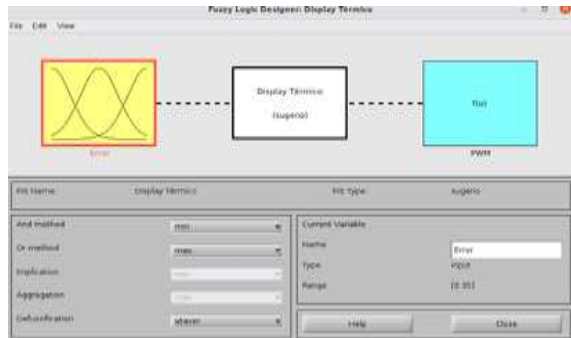


Figura 6. Implementación del sistema de control difuso tipo Sugeno en el ambiente Matlab.

La superficie de control obtenida refleja el comportamiento del sistema ante una serie de datos de entrada dentro del universo del discurso de la variable. Se observó que a medida que el error se incrementaba, existe una tendencia a incrementar el valor de la variable de salida PWM en un esfuerzo por incrementar la temperatura del sistema. Por el contrario, cuando el error se aproxima a cero, la magnitud en la variable de salida PWM llega a descender, sin llegar totalmente a 0, tal y como se observa en la superficie de control presentada en la Figura 7.

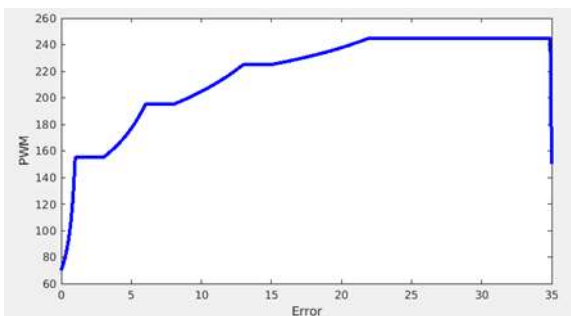


Figura 7. Superficie de control obtenida mediante el software Matlab.

El sistema de enfriamiento por agua resultó ser eficiente al lograr enfriar la superficie exterior del tubo rápidamente, alrededor de 7 minutos, por lo que el sistema regresa a su condición inicial de temperatura de operación. Al mantener la mano sujeta a la superficie de contacto durante la rápida etapa de enfriamiento con la circulación interna de agua, la drástica disminución de temperatura provocó una sensación de humedad en la

palma de la mano, en coincidencia con trabajos que han descrito tal comportamiento con anterioridad (Han et al. 2020; Peiris, Chan & Minamizawa 2018). En concordancia con la literatura, se observó que la información visual desplegada mediante distintos colores de los objetos virtuales, permitió reforzar la información térmica que se le proporciona al usuario a través de la superficie de contacto (Kim et al. 2020). Este proceso es de particular utilidad para la educación y el entrenamiento de situaciones que involucran cambios de temperatura. En general, la variable de temperatura es de una naturaleza de primer orden, con cambios paulatinos en el tiempo, por lo que es importante el desarrollo de dispositivos hápticos del tipo pantalla térmica en lugar de usar dispositivos basados en vibración (Gallo et al. 2015), los cuales en ocasiones se perciben como intrusivos, por lo que pueden desviar la atención del usuario a la situación que se le plantea en el ambiente virtual.

4. Conclusiones

Se ha diseñado e implementado un dispositivo de retroalimentación háptica en forma de pantalla térmica con fines didácticos. Se integraron elementos electrónicos de bajo costo y celdas termoelectricas como elementos actuadores de calentamiento para obtener un controlador automático. A través del diseño de un sistema difuso de tipo Sugeno se implementó una rutina en Lenguaje Arduino con el objetivo de regular las etapas de calentamiento. La curva de respuesta con el controlador difuso presentó un desempeño satisfactorio, al alcanzar cada una de las referencias previamente programadas.

Se desarrolló una aplicación de realidad virtual en Unity que permitió la visualización dinámica de un termómetro con escalas de color, a partir de la integración de objetos cúbicos ordenados en forma horizontal. El arreglo de estos permitió representar en una

escala de colores, los estados de temperatura en el cuerpo previamente asignados. Se trata de una herramienta educativa para desplegar información térmica, con potencial de ser utilizada en situaciones médicas, educativas y/o de entrenamiento, focalizada en el desarrollo de destrezas y habilidades motrices que requieran de la percepción y representación de estados térmicos en el ambiente de aprendizaje.

En el presente trabajo, a través de realidad virtual ha sido posible simular cuatro estados de temperatura corporal: hipotermia, normal, fiebre e hiperpirexia. La interacción del dispositivo háptico con la realidad virtual se refuerza la representación de los distintos estados térmicos de un ser humano, vinculando la información plenamente visual con la percepción háptica del usuario, favoreciendo el aprendizaje multisensorial. El incremento del realismo e inmersión incrementa la atención y enfoque del usuario, en el marco de la realidad extendida. A la par de su potencial educativo, esta clase de instrumentos cuenta con una perspectiva interesante de uso en personas que presentan disminución en el sentido de la vista, ya sea enviando señales de alerta o riesgo ante situaciones adversas, o como sistemas de comunicación sensorial para la transmisión y recepción de emociones y/o estados de ánimo; situaciones que se explorarán en el futuro a partir de los resultados obtenidos en este trabajo.

Otra de las perspectivas a futuro se centra en la exploración de la ilusión temperatura-humedad con realidad virtual y/o aumentada observada durante la etapa de enfriamiento. La exploración de su potencial como tecnología educativa requiere del desarrollo de prototipos como el presentado en este trabajo, que sean accesibles y adaptables para la mayor parte del sector académico interesado en la inclusión de esta forma de

experiencias en los procesos de enseñanza y aprendizaje.

5. Agradecimientos

Se reconoce a CONAHCYT a través del programa “Estancias Posdoctorales por México”.

6. Referencias

1. Zhou, NN., & Deng, YL. (2009). “Virtual Reality: A State-of-the-Art Survey.” *International Journal of Automation and Computing* 6(4):319–25. doi: 10.1007/s11633-009-0319-9.
2. Carmigniani, J., & Furht, B. (2011). “Augmented reality: an overview”. *Handbook of augmented reality*, 3-46.
3. Izard, S. G., Juanes Méndez, J. A., & Palomera, P. R. (2017). “Virtual reality educational tool for human anatomy”. *Journal of medical systems*, 41, 1-6.
4. Buentello-Montoya, D. A., Lomelí-Plascencia, M. G., & Medina-Herrera, L. M. (2021). “The role of reality enhancing technologies in teaching and learning of mathematics”. *Computers & Electrical Engineering*, 94, 107287.
5. Neroni, M. A., Oti, A., & Crilly, N. (2021). “Virtual Reality design-build-test games with physics simulation: opportunities for researching design cognition”. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 9(3), 139-173.
6. Cheng, A., Yang, L., & Andersen, E. (2017). “Teaching language and culture with a virtual reality game”. In *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems*, 541-549.
7. Collaço, E., Kira, E., Sallaberry, L. H., Queiroz, A. C., Machado, M. A., Crivello Jr, O., & Tori, R. (2021). “Immersion and haptic feedback impacts on dental anesthesia

technical skills virtual reality training”. *Journal of Dental Education*, 85(4), 589-598.

8. Sapkaroski, D., Baird, M., McNerney, J., & Dimmock, M. R. (2018). “The implementation of a haptic feedback virtual reality simulation clinic with dynamic patient interaction and communication for medical imaging students”. *Journal of medical radiation sciences*, 65(3), 218-225.

9. Richard, E., Tijou, A., Richard, P., & Ferrier, J. L. (2006). “Multi-modal virtual environments for education with haptic and olfactory feedback”. *Virtual Reality*, 10, 207-225.

10. Lontschar, S., Deegan, D., Humer, I., Pietroszek, K., & Eckhardt, C. (2020). “Analysis of haptic feedback and its influences in virtual reality learning environments”. In *2020 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)*, 171-177. IEEE.

11. Edwards, B. I., Bielawski, K. S., Prada, R., & Cheok, A. D. (2019). “Haptic virtual reality and immersive learning for enhanced organic chemistry instruction”. *Virtual Reality*, 23, 363-373.

12. Grajewski, D., Górski, F., Hamrol, A., & Zawadzki, P. (2015). “Immersive and haptic educational simulations of assembly workplace conditions”. *Procedia Computer Science*, 75, 359-368.

13. Noghabaei, M., & Han, K. (2021). “Object manipulation in immersive virtual environments: Hand Motion tracking technology and snap-to-fit function”. *Automation in Construction*, 124, 103594.

14. Motaharif, M., Norouzzadeh, A., Abdi, P., Iranfar, A., Lotfi, F., Moshiri, B., ... & Taghirad, H. D. (2021). “Applications of haptic technology, virtual reality, and artificial intelligence in medical training during the COVID-19 pandemic”. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 612949.

15. Sanfilippo, F., Blazauskas, T., Salvietti, G., Ramos, I., Vert, S., Radianti, J., ... & Oliveira, D. (2022). “A perspective review on integrating VR/AR with haptics into STEM education for multi-sensory learning”. *Robotics*, 11(2), 41.

16. Gallo, S., Rognini, G., Santos-Carreras, L., Vouga, T., Blanke, O., & Bleuler, H. (2015). “Encoded and crossmodal thermal stimulation through a fingertip-sized haptic display”. *Frontiers in Robotics and AI*, 2, 25.

17. Kim, S. W., Kim, S. H., Kim, C. S., Yi, K., Kim, J. S., Cho, B. J., & Cha, Y. (2020). “Thermal display glove for interacting with virtual reality”. *Scientific reports*, 10(1), 11403.

18. Hirai, S., & Miki, N. (2019). “A thermal tactile sensation display with controllable thermal conductivity”. *Micromachines*, 10(6), 359.

19. Carnahan, H., Dubrowski, A., & Grierson, L. E. (2010). “Temperature influences both haptic perception and force production when grasping”. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(1), 55-58.

20. Kuhtz-Buschbeck, J. P., & Hagenkamp, J. (2020). “Cold and heavy: grasping the temperature-weight illusion”. *Experimental brain research*, 238, 1107-1117.

21. Ho, H. N., Chow, H. M., Tsunokake, S., & Roseboom, W. (2019). “Thermal-tactile integration in object temperature perception”. *IEEE transactions on haptics*, 12(4), 594-603.

22. Trojan, J., Fuchs, X., Speth, S. L., & Diers, M. (2018). “The rubber hand illusion induced by visual-thermal stimulation”. *Scientific reports*, 8(1), 12417.

23. Ho, H. N., Iwai, D., Yoshikawa, Y., Watanabe, J., & Nishida, S. Y. (2014). "Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object". *Scientific reports*, 4(1), 5527.
24. Gil, J. J., Diaz, I., Justo, X., & Ciáurriz, P. (2014). "Educational haptic controller based on Arduino platform". In *2014 XI Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (Technologies Applied to Electronics Teaching) (TAEE)*, 1-7. IEEE.
25. Sanfilippo, F., & Pettersen, K. Y. (2015). "A sensor fusion wearable health-monitoring system with haptic feedback". In *2015 11th International conference on innovations in information technology (IIT)*, 262-266. IEEE.
26. Lira-Cortés, L., González Rodríguez, O. J., & Méndez-Lango, E. (2008). "Sistema de medición de la conductividad térmica de materiales sólidos conductores, diseño y construcción". In *Simposio de Metrología Santiago de Querétaro: Querétaro, Mexico*.
27. Jingzhuo, W., & Chenglong, G. (2007). "Research on 1-wire bus temperature monitoring system". In *2007 8th international conference on electronic measurement and instruments*, 3-722. IEEE.
28. Sattar, H., Bajwa, I. S., Amin, R. U., Sarwar, N., Jamil, N., Malik, M. A., ... & Shafi, U. (2019). "An IoT-based intelligent wound monitoring system". *IEEE Access*, 7, 144500-144515.
29. Campbell, I. (2008). "Body temperature and its regulation". *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 9(6), 259-263.
30. Han, T., Wang, S., Wang, S., Fan, X., Liu, J., Tian, F., & Fan, M. (2020). "Mouillé: Exploring wetness illusion on fingertips to enhance immersive experience in vr". In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-10.
31. Peiris, R. L., Chan, L., & Minamizawa, K. (2018). "LiquidReality: wetness sensations on the face for virtual reality". In *Haptics: Science, Technology, and Applications: 11th International Conference, EuroHaptics 2018, Pisa, Italy, June 13-16, 2018, Proceedings, Part II 11*, 366-378. Springer International Publishing.