
**Análisis De Efectividad De Uso De Simulador Para Entrenamiento Auditivo En Detección
De Fallas De Soldadura MIG/MAG**

Ramiro León Ceschini

Facultad de Tecnología Informática, Universidad Abierta Interamericana

Licenciatura en Producción de Simuladores y Videojuegos

Ing. David Curras

Lic. Mariano Nicolás Ezequiel Rodríguez

5 de junio de 2026



Índice

Índice.....	2
Agradecimientos.....	3
Resumen.....	4
Abstract.....	5
Análisis De Efectividad De Uso De Simulador Para Entrenamiento Auditivo En Detección De Fallas de Soldadura MIG/MAG.....	6
Planteamiento Del Problema.....	6
Objetivos.....	8
Hipótesis.....	8
Marco Teórico.....	8
Funcionamiento básico de la soldadura MIG/MAG.....	8
Capacitación Con Simuladores.....	11
El Sonido En La Detección De Fallas.....	11
Entrenamiento De Reconocimiento De Señales Sonoras.....	12
Proceso De Desarrollo Del Simulador.....	14
Modelo De Funcionamiento Del Simulador.....	14
Modelo Pedagógico Del Simulador.....	17
Selección Del Motor De Desarrollo.....	18
Enfoque En El Componente Auditivo.....	20
Pipeline De Producción E Integración De Audio.....	21
Elementos De Captura Y Edición.....	23
Análisis Espectrales De Las Muestras.....	26
Integración De Audio En El Simulador.....	30
Sistema De Almacenamiento De Datos.....	30
Diseño De Interfaz De Usuario.....	31
Diseño De La Investigación.....	33
Métricas Y Datos Clave A Medir.....	33
Población Y Muestra.....	34
Criterios De Inclusión.....	34
Procedimiento.....	34
Análisis De Datos.....	37
Resultados.....	38
Discusión.....	44
Referencias.....	47
Anexo.....	49

Agradecimientos

Expreso mediante este apartado mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible esta investigación. A mi padre, David Ceschini, por enseñarme todo lo que sé sobre el campo de la soldadura y por facilitar los elementos necesarios a la hora de hacer pruebas con una máquina real; a los participantes, por prestar su voluntad, tiempo y compromiso con el experimento; y a los supervisores de trabajo final, Ing. David Curras y Lic. Mariano Nicolás Ezequiel Rodríguez, por acompañar y aconsejarme durante todo el proceso.

También aprovecho para agradecer a los profesores de la carrera, que con su interés y paciencia para enseñar, me transmitieron los conocimientos y técnicas necesarios para desarrollar el simulador utilizado en la investigación, así como demás proyectos a futuro.

Por último agradezco a mis amigos, familia y pareja por estar siempre a mi lado y apoyarme en los momentos en que más los necesito.

Resumen

Este trabajo evalúa la efectividad de un simulador de entrenamiento auditivo diseñado para ayudar a reconocer fallas en soldadura MIG/MAG a partir del sonido del proceso. Como parte del desarrollo del sistema, se realizaron grabaciones de soldadura en distintos estados operativos (condición óptima y fallas comunes), las cuales fueron editadas, procesadas y analizadas mediante espectrogramas para verificar la presencia de diferencias acústicas identificables entre los escenarios. El simulador fue implementado como una aplicación de escritorio utilizando el motor gráfico Unity, integrando las pistas de audio dentro de un entorno interactivo que permite reproducir fallas de forma controlada y registrar el desempeño de los usuarios durante las sesiones.

Primero se verificó la fidelidad del simulador con soldadores profesionales, quienes identificaron correctamente los sonidos en casi todos los casos, lo que confirmó el realismo de los estímulos utilizados. Luego, seis participantes sin experiencia realizaron una prueba inicial, practicaron con el simulador durante una semana y repitieron la evaluación. Los resultados muestran una mejora global clara en la detección de fallas tras la exposición repetida a los sonidos, aunque con diferencias entre participantes y sin una relación directa entre la cantidad de práctica y la magnitud de la mejora.

En conjunto, los hallazgos indican que el entrenamiento auditivo por repetición favorece el aprendizaje perceptivo y que el simulador puede utilizarse tanto como herramienta formativa como apoyo para evaluar experiencia auditiva en contextos profesionales.

Palabras clave: entrenamiento auditivo, memoria auditiva por repetición, simulación, soldadura MIG/MAG, aprendizaje perceptivo, detección de fallas.

Abstract

This study evaluates the effectiveness of an auditory training simulator designed to help users recognize faults in MIG/MAG welding based on the sound of the welding process. As part of the system's development, welding sounds were recorded under different operating conditions (optimal welding and common fault scenarios). These recordings were edited, processed, and analyzed through spectrograms in order to verify the presence of identifiable acoustic differences between the scenarios. The simulator was implemented as a desktop application using the game engine Unity, integrating the audio tracks into an interactive environment that allows controlled playback of welding faults while recording user performance during training sessions.

First, the fidelity of the simulator was validated with professional welders, who correctly identified the sounds in almost all cases, confirming the realism of the stimuli used in the system. Subsequently, six participants with no prior welding experience completed an initial test, practiced with the simulator for one week, and then repeated the evaluation. The results show a clear overall improvement in fault detection after repeated exposure to the sounds, although differences between participants were observed and no direct relationship was found between the amount of practice and the magnitude of improvement.

Overall, the findings indicate that repetition-based auditory training supports perceptual learning and that the simulator may be used both as a training tool and as a complementary resource for assessing auditory experience in professional contexts.

Keywords: auditory training, repetition-based auditory memory, simulation, MIG/MAG welding, perceptual learning, fault detection.

Análisis De Efectividad De Uso De Simulador Para Entrenamiento Auditivo En Detección De Fallas de Soldadura MIG/MAG

En muchas PYMES que realizan trabajos de soldadura, capacitar a nuevos empleados o verificar sus conocimientos previos representa un desafío. El aprendizaje práctico requiere una alta inversión de tiempo y el uso de maquinaria y materiales costosos. Esto limita la formación de personal y genera pérdidas económicas en el proceso de capacitación.

Actualmente, las empresas con mayores recursos suelen limitarse a contratar personal con experiencia certificada en soldadura como explican Giordano y Mansilla (2018), evitando así los costos y riesgos asociados a la capacitación. Por otro lado, las pequeñas y medianas empresas, que no siempre pueden acceder a ese tipo de mano de obra calificada, asumen el desafío de capacitar internamente a sus empleados, lo cual implica un gasto considerable en materiales y desgaste de maquinaria. En respuesta a esta problemática, se desarrollaron simuladores de soldadura que permiten entrenar ciertas habilidades sin necesidad de utilizar equipos reales, reduciendo costos y riesgos, aunque en general estos dispositivos priorizan el componente visual y técnico del proceso por sobre otros aspectos igualmente relevantes, como el auditivo.

Planteamiento Del Problema

El origen de este proyecto se encuentra directamente vinculado con mi experiencia personal en el ámbito de la soldadura. Durante aproximadamente siete años trabajé en este campo, aprendiendo el oficio principalmente dentro del entorno laboral y a través de la práctica cotidiana. Este tipo de aprendizaje es habitual en muchos talleres y pequeñas empresas metalúrgicas, donde gran parte del conocimiento técnico se transmite mediante la observación y la repetición más que a través de instancias formales de capacitación.

Uno de los aspectos más complejos para quienes se inician en la soldadura no es únicamente ejecutar la técnica, sino aprender a reconocer y diagnosticar los problemas que

pueden surgir durante el proceso. Cuando un operario principiante comienza a soldar, generalmente puede percibir que algo no funciona correctamente en la máquina. Sin embargo, identificar con precisión el origen de la falla suele resultar mucho más difícil. Esta capacidad se desarrolla principalmente con la experiencia, ya que muchas de las irregularidades del proceso no se presentan de manera constante y requieren ser experimentadas varias veces antes de poder ser reconocidas con seguridad.

En este proceso de aprendizaje, el sonido de la soldadura cumple un rol fundamental. Los soldadores con mayor experiencia suelen utilizar las señales auditivas producidas por la máquina como un indicador rápido del estado del proceso, permitiéndoles ajustar parámetros como la potencia eléctrica o el suministro de gas. En este sentido, el oído funciona como una herramienta complementaria de diagnóstico que permite anticipar problemas antes de que estos se manifiesten visualmente en la calidad del cordón de soldadura. No obstante, adquirir esta habilidad requiere una exposición prolongada a diferentes situaciones de trabajo, algo que en contextos reales puede tomar meses o incluso años.

Por todo esto, se plantea la siguiente pregunta:

“¿En qué medida un simulador auditivo puede mejorar la capacitación de soldadores en la detección de fallas?”

Así surge la motivación central de este proyecto: explorar la posibilidad de facilitar el aprendizaje de esta habilidad mediante un simulador enfocado específicamente en el entrenamiento auditivo. La idea principal consiste en aumentar la exposición de los aprendices a los distintos sonidos característicos del proceso de soldadura, permitiéndoles reconocer con mayor rapidez las señales que indican la presencia de fallas. De este modo, el simulador no busca reemplazar la práctica real, sino complementar los procesos de formación tradicionales mediante una herramienta que permita ejercitar la percepción auditiva de forma repetitiva y controlada.

Objetivos

Con este planteamiento en mente, se propone como objetivo general de la investigación, el definir si la implementación del simulador auditivo en procesos de aprendizaje de soldadura puede o no mejorar la capacidad de identificar fallas en la máquina.

Como objetivos específicos encontramos: comprobar si el simulador desarrollado es fiel a los sonidos que produce una soldadura real, haciendo pruebas con soldadores experimentados y comparando la capacidad de reconocimiento de estos con la de los aprendices; rastrear y analizar el rendimiento de los usuarios con el simulador para identificar cambios en la capacidad de reconocimiento y tiempo de reacción frente a una falla; y por último, analizar el impacto que tiene el uso del simulador sobre un escenario real, efectuando pruebas de reconocimiento con una máquina de soldar.

Hipótesis

De esta problemática y los objetivos del trabajo, se desprenden las siguientes hipótesis:

Los operarios capacitados mediante un simulador auditivo especializado en soldadura MIG desarrollarían una mayor capacidad para identificar fallas en el proceso de soldadura a través de señales sonoras.

Los usuarios del simulador lograrían reducir su tiempo de respuesta frente a señales auditivas que indiquen una falla a medida que usen el programa.

Marco Teórico

Funcionamiento básico de la soldadura MIG/MAG

Para comprender el funcionamiento del proceso de soldadura utilizado como referencia en este trabajo, resulta útil describir brevemente los principios básicos de la soldadura MIG/MAG. La explicación presentada a continuación se basa principalmente en los conceptos técnicos expuestos en “*MIG Welding Guide*” (2006).

La soldadura MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) es un proceso de soldadura por arco eléctrico en el cual un alambre metálico continuo actúa simultáneamente como electrodo y material de aporte. Este alambre es alimentado automáticamente a través de una torcha (o antorcha) mientras se establece un arco eléctrico entre el extremo del alambre y la pieza de trabajo. El calor generado por el arco produce la fusión del material base y del alambre, formando el cordón de soldadura.

Durante el proceso, un gas protector es liberado alrededor del arco eléctrico con el objetivo de aislar el baño de fusión del contacto con el oxígeno y otros gases presentes en la atmósfera. En el caso de la soldadura MIG se utilizan gases inertes, como argón o helio, mientras que en la soldadura MAG se emplea normalmente dióxido de carbono o mezclas de éste con otros gases activos. Este flujo de gas cumple un rol fundamental para evitar la oxidación del material fundido y asegurar la calidad del cordón de soldadura.

El operario controla distintos parámetros del proceso mediante el panel de la máquina de soldar, entre ellos la potencia eléctrica o voltaje del arco y la velocidad de alimentación del alambre. Estos parámetros determinan en gran medida el comportamiento del arco y la estabilidad del proceso de soldadura. En este trabajo se utilizó una máquina de soldadura modelo Blumig 500, cuyo panel frontal permite regular los principales parámetros del proceso (ver Figura 1). Asimismo, el sistema de gas protector se alimenta desde un cilindro presurizado conectado a la máquina mediante un regulador que permite controlar el caudal del gas utilizado durante la soldadura (ver Figura 2).

Figura 1

Panel frontal de la soldadura utilizada en el experimento.



Fotografía propia (2026).

Figura 2

Soldador profesional mostrando el regulador de suministro de gas de protección.



Fotografía propia (2026).

Cuando estos parámetros no se encuentran correctamente regulados, pueden producirse diferentes tipos de fallas que afectan tanto la calidad de la soldadura como el sonido característico que produce el proceso. En el presente trabajo se consideraron tres fallas comunes: potencia eléctrica elevada, potencia eléctrica insuficiente y falta de gas protector.

Capacitación Con Simuladores

La formación en soldadura, especialmente en contextos de capacitación inicial, se enfrenta a desafíos estructurales vinculados al alto costo de los materiales, al desgaste de la maquinaria y a la dificultad de ofrecer retroalimentación precisa en tiempo real. En respuesta a estas limitaciones, se han desarrollado diversas soluciones tecnológicas que buscan facilitar y mejorar los procesos de enseñanza, entre ellas se encuentran los simuladores virtuales y los sistemas inteligentes basados en señales sensoriales.

Los simuladores de soldadura han cobrado especial relevancia como herramientas accesibles y efectivas para el aprendizaje técnico. Por ejemplo, White y colaboradores (2010) desarrollaron un entorno de simulación de soldadura MIG de bajo costo diseñado para estudiantes principiantes que combina audio, gráficos realistas y hardware específico de soldadura (casco y torcha) para el input. Del mismo modo, Alfaro-Viquez y colaboradores (2025) integraron tecnologías de realidad virtual y dispositivos hápticos en simuladores con retroalimentación visual, sonora y táctil, evidenciando mejoras en los tiempos de ejecución y una disminución de errores en tareas prácticas. Ambos estudios refuerzan la idea de que la simulación puede ser una vía efectiva para la adquisición de habilidades técnicas, en particular si se incluyen múltiples canales sensoriales.

El Sonido En La Detección De Fallas

En este contexto, el sonido se presenta como un canal de información poco explorado pero sumamente relevante, especialmente en tareas donde la calidad del trabajo está directamente relacionada con señales auditivas específicas. En el ámbito de la interacción humano-computadora y la realidad virtual, el feedback auditivo ha sido definido como un mecanismo que transmite información del entorno, revela relaciones causales entre acciones y efectos, y proporciona claves espaciales sobre el origen de los eventos (De Götzen, Magnusson y Castagne, 2014). Según estos autores, mientras que en medios digitales el audio

suele utilizarse para dar alertas o ambientar, su verdadero potencial está en comunicar información estructural y material sobre el objeto o sistema con el que se interactúa.

Particularmente en soldadura, varios estudios han demostrado que los operadores con experiencia son capaces de detectar fallas o irregularidades sólo a través del oído. Cullen (2023) y Lv y colaboradores (2017) desarrollaron sistemas de monitoreo acústico en tiempo real que, utilizando algoritmos de procesamiento de señales, alcanzaron tasas de detección de fallos superiores al 90%. Estos sistemas se basan en identificar patrones de sonido que indican problemas de penetración, falta de gas o alimentación incorrecta del alambre, entre otros. Si bien el trabajo de Lv y colaboradores se centró en soldadura GTAW (no MIG/MAG), los principios de reconocimiento auditivo aplican de manera análoga. En todos los casos, el oído del operario actúa como un sensor entrenado capaz de discriminar entre una soldadura estable y una defectuosa.

Entrenamiento De Reconocimiento De Señales Sonoras

A nivel cognitivo, se ha demostrado que el entrenamiento auditivo específico mejora el rendimiento en tareas complejas, tanto en principiantes como en expertos. Brown y Penhune (2018) compararon el aprendizaje motor y el auditivo en músicos, hallando que los grupos que entrenaban con sonido lograban mejores resultados en menor tiempo. En línea con esto, Singer y Zaltz (2025) evidenciaron que, aunque los adultos mayores presentan ciertas limitaciones en la generalización del aprendizaje auditivo, conservan la capacidad de adquirir nuevas habilidades auditivas con eficiencia. Este punto es relevante para considerar posibles sesgos o limitaciones en la población destinataria de simuladores como el propuesto.

Otras áreas, como la medicina, han utilizado entrenamientos auditivos con éxito. La práctica de la auscultación cardíaca, por ejemplo, se basa en la exposición repetida a sonidos clínicos para entrenar la memoria auditiva del profesional. Tal como se describe en “Teaching Heart Auscultation to Health Professionals” (2011), el principio de repetición auditiva mejora la

precisión diagnóstica, reforzando la idea de que el oído puede ser entrenado de forma similar a un músculo.

Siguiendo esta línea, Lu (2016), propuso un simulador para capacitar trabajadores de la construcción en la identificación de situaciones peligrosas utilizando señales sonoras cuando estas se presentaban. Lu basa su investigación en el concepto de priming (cambio en la conducta por exposición previa a un estímulo), más precisamente al repetition priming o priming por repetición. La base del repetition priming se define como la identificación rápida de un estímulo al cual ya se fue expuesto con anterioridad (Schacter y Addis, 2007). En este caso los obreros que se capacitaron con el simulador pudieron reconocer fácilmente las situaciones de riesgo a las que se enfrentaron.

El repetition priming se complementa con el entrenamiento auditivo o auditory training explicado en “Handbook of Central Auditory Processing Disorder, Volume II” (2014) como un conjunto de condiciones y tareas diseñados para activar el sistema auditivo y las redes neuronales relacionadas, de manera positiva para su comportamiento. Si bien el enfoque se da en la recuperación de pacientes con pérdida parcial de la audición, los métodos de repetición de sonidos a lo largo de un período de tiempo sirven de ejemplo sobre cómo conseguir una mayor eficiencia en el reconocimiento de señales sonoras.

En conjunto, la evidencia revisada sugiere que un simulador de soldadura enfocado en el entrenamiento auditivo es viable, según aplicaciones en otras áreas; relevante y complementario a las estrategias ya existentes. Este tipo de enfoque permitiría reforzar habilidades poco atendidas en la formación tradicional, aportando a la construcción de operarios más atentos, seguros y eficaces.

Metodología

Proceso De Desarrollo Del Simulador

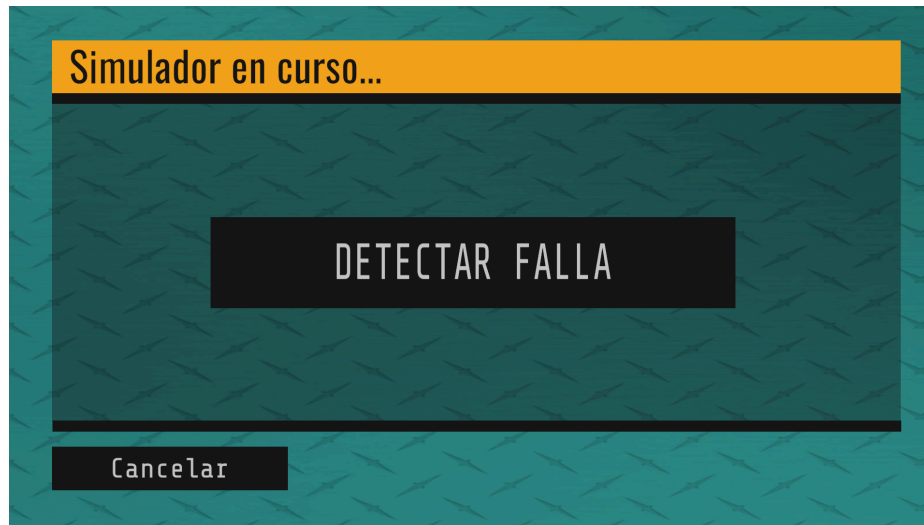
El desarrollo del simulador implicó una serie de decisiones técnicas relacionadas tanto con la producción del material sonoro como con la implementación del software que lo reproduce y gestiona. Debido a que el objetivo principal del sistema es entrenar la detección auditiva de fallas en el proceso de soldadura, se priorizó el diseño de una pipeline de trabajo que permitiera capturar, procesar e integrar grabaciones representativas de distintos estados de la soldadura MIG/MAG. Esta sección describe las herramientas de hardware y software utilizadas durante el desarrollo, los criterios adoptados para la producción y edición del audio, y las decisiones de diseño implementadas dentro del simulador. Asimismo, se presentan análisis espectrales de las grabaciones realizadas, los cuales permiten observar de manera gráfica las diferencias acústicas entre los distintos escenarios de soldadura utilizados como material de entrenamiento.

Modelo De Funcionamiento Del Simulador

El funcionamiento del simulador fue diseñado con el objetivo de reproducir, de manera simplificada, una situación de escucha progresiva en la que el usuario pueda identificar cambios en el comportamiento acústico del proceso de soldadura. La sesión comienza reproduciendo el sonido correspondiente a una soldadura en estado óptimo, estableciendo así una referencia auditiva inicial para el participante (en la Figura 3 se observa la representación de este momento en la interfaz de usuario). Este punto de partida cumple una función importante dentro del entrenamiento perceptual, ya que permite que el usuario se familiarice con el patrón sonoro esperado antes de que se introduzca cualquier variación asociada a una falla.

Figura 3

Pantalla de detección de falla dentro del simulador.



Captura tomada del simulador SEADFS, elaboración propia (2026).

Luego de un breve período de reproducción estable, el sistema introduce una modificación en el estímulo sonoro mediante una transición gradual entre pistas de audio. Esta transición se implementa mediante un fundido cruzado (crossfade), técnica que permite superponer temporalmente dos señales sonoras mientras una disminuye su intensidad y la otra aumenta progresivamente. El objetivo de este procedimiento es evitar cambios abruptos que puedan resultar artificiales o excesivamente evidentes, permitiendo que la variación acústica se perciba de manera más natural dentro del flujo sonoro de la simulación.

La pista que se introduce durante esta transición corresponde a una situación de soldadura con falla, seleccionada de manera aleatoria entre tres posibles condiciones: falta de gas de protección, potencia eléctrica elevada y potencia eléctrica insuficiente. La aleatorización de las fallas tiene como finalidad evitar patrones repetitivos entre las distintas ejecuciones del simulador, promoviendo que el reconocimiento se base en la identificación de características sonoras y no en la anticipación del comportamiento del sistema.

Con el mismo objetivo de evitar estrategias de memorización, cada pista de audio comienza su reproducción desde un punto aleatorio dentro del bucle sonoro. De esta manera, aunque un participante realice múltiples sesiones de entrenamiento, las variaciones temporales

dentro del audio reducen la posibilidad de que el reconocimiento de la falla se base en recordar momentos específicos de la grabación. Este mecanismo busca favorecer un aprendizaje centrado en la percepción de patrones acústicos generales, en lugar de la memorización de fragmentos particulares.

Una vez realizada la detección, el simulador presenta una pantalla de reconocimiento (Figura 4) en la que el usuario debe identificar la posible causa de la falla percibida. Para ello se ofrecen cuatro opciones de respuesta: las tres condiciones de falla incluidas en el sistema y una opción adicional destinada a aquellos casos en los que el usuario no logra reconocer el origen del cambio acústico. La inclusión de esta última alternativa busca evitar respuestas forzadas y permite registrar de manera más precisa los casos en los que la identificación no resulta posible.

Figura 4

Pantalla de identificación de origen de la falla dentro del simulador.



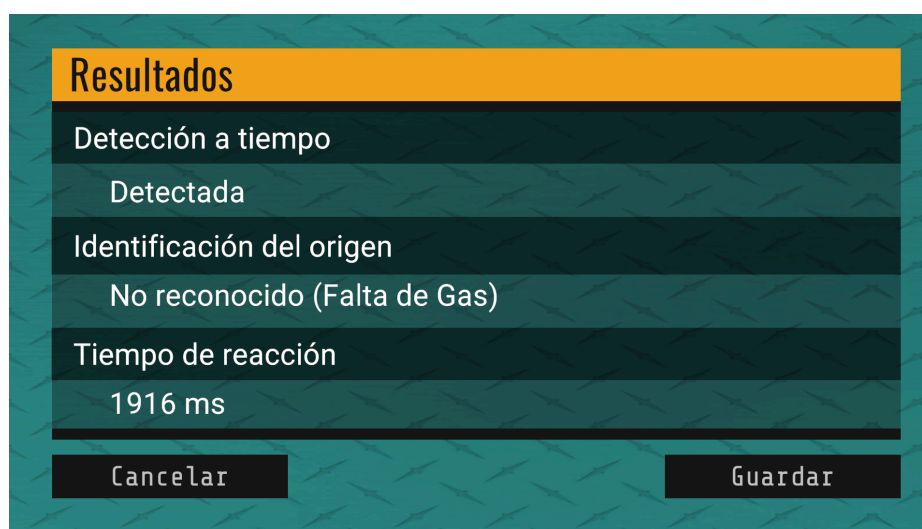
Captura tomada del simulador SEADFS, elaboración propia (2026).

Finalmente, al concluir cada ciclo de entrenamiento, el sistema presenta al usuario un resumen de los resultados obtenidos durante la sesión (Figura 5). En caso que el participante haya cometido un error en la identificación de la falla, el simulador informa la respuesta

correcta, permitiendo así reforzar el proceso de aprendizaje mediante la retroalimentación inmediata. Este mecanismo de feedback cumple una función pedagógica importante, ya que permite que el usuario relacione de forma directa el estímulo auditivo percibido con la condición técnica que lo genera, fortaleciendo progresivamente su capacidad de reconocimiento acústico.

Figura 5

Pantalla de resultados dentro del simulador.



Captura tomada del simulador SEADFS, elaboración propia (2026).

Modelo Pedagógico Del Simulador

El diseño del simulador se basa en un enfoque de entrenamiento perceptual orientado al desarrollo de habilidades de reconocimiento auditivo aplicadas a una tarea técnica específica. En el contexto de la soldadura MIG/MAG, el sonido del arco eléctrico constituye una fuente constante de información para el operador, ya que distintas condiciones del proceso producen variaciones perceptibles en el patrón acústico generado durante el trabajo. A partir de esta premisa, el simulador busca reproducir de forma controlada este tipo de situaciones con el objetivo de entrenar la capacidad del aprendiz para detectar e interpretar dichas variaciones.

El modelo de entrenamiento implementado se apoya en principios de aprendizaje perceptual, entendidos como procesos mediante los cuales la exposición repetida a

determinados estímulos sensoriales mejora progresivamente la capacidad de discriminación del individuo (Prettyman, 2019). En este caso, la repetición de situaciones sonoras asociadas a diferentes condiciones de soldadura permite que el usuario desarrolle una mayor sensibilidad para reconocer patrones acústicos específicos y distinguir entre estados de funcionamiento correctos y defectuosos.

El simulador propone una dinámica de aprendizaje progresiva en la que el usuario primero debe detectar una anomalía en el sonido de la soldadura y luego identificar la causa técnica de dicha variación. Este enfoque busca desarrollar inicialmente la sensibilidad a los cambios auditivos y, posteriormente, la asociación entre esos cambios y las condiciones del proceso que los generan. Para favorecer un aprendizaje basado en el reconocimiento de patrones y no en la memorización, el sistema introduce variaciones en el momento de aparición de las fallas y en el punto de inicio de los fragmentos de audio. Además, el simulador proporciona retroalimentación inmediata sobre las respuestas del usuario y registra los resultados de cada sesión, lo que permite analizar la evolución del desempeño a lo largo del entrenamiento y evaluar la efectividad de la herramienta como recurso pedagógico.

En conjunto, este modelo pedagógico busca aprovechar las capacidades del medio digital para ofrecer un entorno de entrenamiento repetible, controlado y seguro, donde los usuarios puedan desarrollar habilidades de reconocimiento auditivo vinculadas al proceso de soldadura sin depender exclusivamente de la práctica directa en entornos de trabajo reales.

Selección Del Motor De Desarrollo

Para el desarrollo del simulador se optó por utilizar el motor de desarrollo Unity. Esta elección responde principalmente a su versatilidad como entorno de creación de aplicaciones interactivas y a su amplia adopción en proyectos de simulación, prototipado y desarrollo de videojuegos. Unity ofrece un ecosistema robusto que facilita la integración de distintos sistemas

necesarios para este proyecto, tales como la gestión de audio, la interacción con el usuario, el registro de datos y la construcción de interfaces gráficas.

Otro aspecto relevante en la selección de esta herramienta es la experiencia previa del investigador en el uso de dicho entorno de desarrollo. Contar con un conocimiento práctico del motor permitió acelerar significativamente las etapas de implementación y prototipado, reduciendo los tiempos de aprendizaje asociados a nuevas plataformas y permitiendo enfocar los esfuerzos principalmente en el diseño del sistema de entrenamiento auditivo y en la experimentación con los usuarios.

Asimismo, Unity cuenta con un sistema de reproducción y manipulación de audio suficientemente flexible para representar de manera precisa las grabaciones utilizadas en el entrenamiento auditivo propuesto, lo cual resulta fundamental para la fidelidad del simulador y para la correcta evaluación de la capacidad de reconocimiento de los participantes.

Se decidió implementar el simulador como una aplicación de escritorio (desktop) en lugar de orientarlo a plataformas móviles o a entornos de realidad virtual. Esta decisión responde principalmente a criterios de accesibilidad, estabilidad técnica y simplicidad de implementación. Las aplicaciones de escritorio presentan menos restricciones en términos de compatibilidad de hardware y permiten un control más directo sobre los dispositivos de salida de audio, lo cual resulta especialmente relevante en un proyecto cuyo eje central es la percepción auditiva.

El desarrollo para plataformas móviles o de realidad virtual, si bien ofrece ciertas ventajas en términos de inmersión o portabilidad, introduce una serie de desafíos técnicos adicionales vinculados a la fragmentación de dispositivos, diferencias en sistemas operativos, y variaciones en la calidad de los sistemas de reproducción de audio. Estas variables podrían afectar la consistencia de la experiencia sonora entre distintos usuarios, comprometiendo la fidelidad del entrenamiento auditivo propuesto.

Enfoque En El Componente Auditivo

El simulador desarrollado en este trabajo se centra exclusivamente en el componente auditivo del proceso de soldadura, sin replicar la interacción física propia de la actividad. A diferencia de otros simuladores de soldadura existentes, que buscan reproducir de forma integral la experiencia operativa mediante interfaces físicas, controladores especializados o entornos de realidad virtual, el objetivo de esta herramienta es aislar una dimensión específica del proceso: la interpretación de las señales sonoras generadas durante la soldadura.

Esta decisión responde a un criterio metodológico orientado a reducir la cantidad de variables involucradas en el proceso de aprendizaje. La práctica real de la soldadura implica la coordinación simultánea de múltiples habilidades, entre ellas el control motor de la torcha, la interpretación visual del baño de fusión y la percepción auditiva del comportamiento del arco eléctrico. Al concentrar el entrenamiento exclusivamente en el componente auditivo, el simulador permite que los usuarios focalicen su atención en la discriminación y reconocimiento de patrones sonoros, sin las distracciones o exigencias cognitivas asociadas a la ejecución física de la tarea.

Este enfoque resulta especialmente relevante para el propósito de la investigación, ya que permite evaluar de manera más directa la capacidad de los participantes para identificar cambios acústicos asociados a fallas en el proceso de soldadura. De esta forma, el simulador actúa como una herramienta de entrenamiento perceptual especializada, complementaria a las prácticas tradicionales de soldadura, que posteriormente pueden integrar nuevamente las distintas dimensiones sensoriales y motoras del trabajo real.

Asimismo, la simplificación del entorno de simulación contribuye a facilitar su implementación en contextos educativos o de capacitación técnica, donde la disponibilidad de equipamiento especializado puede ser limitada. Al requerir únicamente un ordenador y auriculares para su funcionamiento, el sistema propuesto reduce las barreras de acceso al

entrenamiento auditivo, permitiendo su utilización como complemento dentro de programas de formación existentes.

Pipeline De Producción E Integración De Audio

El desarrollo del simulador requirió la implementación de un flujo de trabajo específico para la captura, preparación e integración de los estímulos sonoros utilizados durante las sesiones de entrenamiento. Este proceso se organizó en una pipeline de producción de audio, compuesta por varias etapas consecutivas que permitieron transformar las grabaciones originales del proceso de soldadura en recursos sonoros aptos para su utilización dentro del software.

La primera etapa consistió en la captura de las grabaciones de soldadura en condiciones reales de trabajo. Durante esta fase se registraron diferentes situaciones del proceso de soldadura MIG/MAG, incluyendo tanto el funcionamiento óptimo de la máquina como escenarios donde se presentan fallas características. Estas grabaciones constituyen la base sonora del simulador, ya que representan los estímulos auditivos que posteriormente deben ser identificados por los usuarios durante el entrenamiento. Debido a las condiciones propias del proceso de soldadura, que implican altas temperaturas, proyección de chispas y partículas metálicas, se tomaron diversas medidas preventivas para proteger el equipo de registro. Tanto el micrófono como el equipo informático fueron ubicados a una distancia segura del punto de soldadura y resguardados mediante barreras físicas que redujeran la exposición directa a las chispas y al calor generado por el arco eléctrico. Estas precauciones permitieron realizar las grabaciones sin comprometer la integridad del equipamiento utilizado.

Una vez obtenidas las grabaciones, se procedió a una segunda etapa de edición y preparación del material sonoro mediante el uso de una estación de trabajo de audio digital. En esta fase se realizaron tareas de limpieza básica de las pistas, recorte de los fragmentos relevantes y selección de segmentos representativos de cada condición de soldadura. El

objetivo de esta etapa fue aislar aquellos fragmentos donde las características acústicas del proceso resultan más claras y consistentes.

Posteriormente, las grabaciones fueron adaptadas para su uso dentro del simulador mediante la creación de bucles de audio (loops). Este procedimiento consiste en seleccionar segmentos del sonido que pueden reproducirse de forma continua sin generar interrupciones audibles. La utilización de loops permite simular procesos de soldadura prolongados sin necesidad de utilizar grabaciones excesivamente largas, optimizando así el uso de recursos dentro del sistema.

Una vez finalizada la preparación del material sonoro, los archivos fueron exportados en formato WAV sin compresión, garantizando que la señal de audio conserve la mayor fidelidad posible respecto de la grabación original. Estos archivos constituyen los recursos de audio utilizados por el simulador durante la ejecución de las sesiones de entrenamiento.

La etapa final de la pipeline corresponde a la integración de los recursos sonoros dentro del motor de desarrollo Unity, donde las pistas de audio son reproducidas en base a la lógica de funcionamiento del simulador. En esta fase se implementaron los sistemas de reproducción de sonido, las transiciones entre estados de audio y los mecanismos de variación temporal que permiten iniciar cada pista desde diferentes puntos dentro del loop. Estas funcionalidades permiten que las sesiones de entrenamiento presenten variaciones entre ejecuciones, reduciendo la posibilidad de aprendizaje basado únicamente en la memorización de fragmentos específicos.

En conjunto, esta pipeline permitió establecer un flujo de trabajo claro para la producción y utilización de los estímulos auditivos del simulador, asegurando que las grabaciones originales puedan ser transformadas en recursos sonoros adecuados para el entrenamiento perceptual propuesto por el sistema.

Elementos De Captura Y Edición

Para la captura de las grabaciones de soldadura utilizadas en el simulador se empleó el micrófono Samson Go Mic, un micrófono de condensador USB (ver Figura 6), conectado a un ordenador portátil. La elección de este dispositivo responde a un equilibrio entre calidad de captura, facilidad de implementación y disponibilidad de equipamiento.

Figura 6

Micrófono utilizado para la grabación de sonido correspondiente a las distintas instancias de la soldadura.



Fotografía propia (2026).

Este micrófono ofrece una respuesta en frecuencia de 20 Hz a 20 kHz en modo omnidireccional, rango que cubre prácticamente la totalidad del espectro audible humano. Además, posee una conversión digital de 16 bits con frecuencias de muestreo de 44.1 kHz o 48 kHz, valores estándar en grabación digital que permiten registrar con suficiente fidelidad los cambios acústicos presentes en el proceso de soldadura.

Otra característica relevante es su cápsula de condensador, la cual presenta una buena sensibilidad para captar detalles sonoros y transitorios rápidos, algo particularmente útil para

registrar fenómenos acústicos como el chisporroteo del arco eléctrico o las variaciones de estabilidad durante la soldadura.

Adicionalmente, al tratarse de un dispositivo USB, el micrófono integra su propio conversor analógico-digital, lo que permite prescindir de interfaces de audio externas y simplifica considerablemente el proceso de captura. Esta característica reduce la complejidad técnica del sistema de grabación y facilita la replicabilidad del procedimiento en otros entornos de investigación.

Desde una perspectiva estrictamente técnica, una configuración de grabación ideal podría haber incluido micrófonos de estudio de mayor gama, como micrófonos de condensador de diafragma grande conectados a una interfaz de audio dedicada. Este tipo de sistemas suele ofrecer mayor profundidad de bits (24 bits), menor ruido propio y mayor rango dinámico.

Sin embargo, la implementación de este tipo de equipamiento introduce también una mayor complejidad operativa, ya que requiere preamplificadores, interfaces de audio y configuraciones adicionales de ganancia. Dado que el objetivo del proyecto no era producir grabaciones con fines musicales o de producción sonora profesional, sino capturar patrones acústicos identificables asociados al proceso de soldadura, se consideró que el nivel de fidelidad proporcionado por el micrófono utilizado era suficiente para los fines del estudio.

Asimismo, el uso de equipamiento relativamente accesible contribuye a mantener la coherencia con el enfoque práctico del proyecto, facilitando que futuras implementaciones del simulador puedan reproducir condiciones de grabación similares sin requerir equipamiento especializado.

En consecuencia, la elección del micrófono responde a un criterio de suficiencia técnica, donde la calidad de captura resulta adecuada para analizar y reproducir las características acústicas relevantes del proceso de soldadura, al mismo tiempo que se mantiene una infraestructura de grabación simple, económica y replicable.

Para la captura, edición y preparación de las grabaciones utilizadas en el simulador se empleó el software REAPER, una estación de trabajo de audio digital (DAW) ampliamente utilizada tanto en entornos profesionales como en proyectos de investigación sonora. La elección de esta herramienta responde a su estabilidad, flexibilidad y a la experiencia previa del investigador en su utilización.

El conocimiento previo del entorno de trabajo permitió realizar las tareas de grabación, edición y procesamiento de audio de manera eficiente, reduciendo el tiempo necesario para la configuración técnica del sistema y permitiendo concentrar los esfuerzos en el análisis y preparación de las muestras sonoras utilizadas en el simulador.

Dentro del proceso de preparación del material sonoro, REAPER se utilizó principalmente para la captura de las grabaciones, la limpieza y recorte de los fragmentos relevantes, y la creación de bucles de audio (loops) que permiten reproducir de manera continua el sonido de la soldadura dentro del simulador. Esta funcionalidad resulta particularmente útil para simular procesos estables de soldadura durante períodos prolongados sin introducir cortes audibles en la reproducción.

Las grabaciones se almacenaron y procesaron utilizando el formato WAV (Waveform Audio File Format). La elección de este formato responde principalmente a su naturaleza no comprimida, lo que permite preservar la totalidad de la información sonora capturada durante el proceso de grabación.

A diferencia de formatos comprimidos como MP3 o AAC, que reducen el tamaño del archivo mediante algoritmos de compresión con pérdida, el formato WAV mantiene la integridad de la señal original. Esta característica resulta especialmente relevante en un proyecto centrado en el reconocimiento de patrones acústicos, donde pequeñas variaciones en la señal sonora pueden constituir indicadores importantes para la detección de fallas en el proceso de soldadura.

Además, el uso de archivos WAV facilita el análisis posterior de las grabaciones mediante herramientas de visualización espectral, al asegurar que los datos utilizados para el análisis corresponden fielmente a la señal capturada.

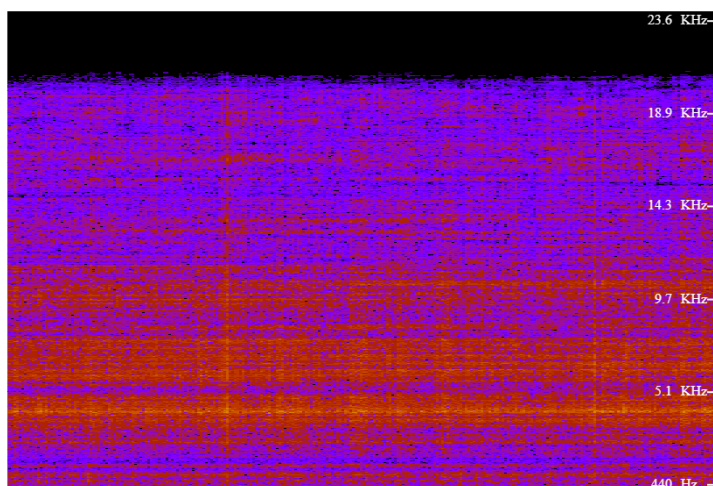
Análisis Espectrales De Las Muestras

Con el objetivo de complementar el análisis de las grabaciones obtenidas y verificar que las distintas condiciones de soldadura presentan características acústicas diferenciables, se realizó una visualización espectral de cada muestra mediante espectrogramas. Este tipo de representación permite observar cómo se distribuye la energía sonora en función del tiempo y de la frecuencia, proporcionando una forma gráfica de analizar las propiedades del sonido registradas durante las grabaciones. En este tipo de visualización, el eje horizontal representa el tiempo, el eje vertical corresponde a la frecuencia y la intensidad del color indica la cantidad de energía (amplitud) presente en cada banda de frecuencia.

El espectrograma correspondiente a la grabación de soldadura en condiciones óptimas muestra una distribución relativamente uniforme de energía a lo largo del tiempo, sin interrupciones abruptas ni variaciones marcadas en la intensidad del sonido (Figura 7). En la representación puede observarse una presencia constante de energía principalmente en las frecuencias medias y bajas, acompañada por un contenido más difuso en las frecuencias superiores. Esta estabilidad en la distribución espectral coincide con el comportamiento esperado de un arco de soldadura correctamente configurado, donde el proceso se mantiene relativamente constante y genera un patrón acústico continuo.

Figura 1

Espectrograma correspondiente a la soldadura en condiciones óptimas.

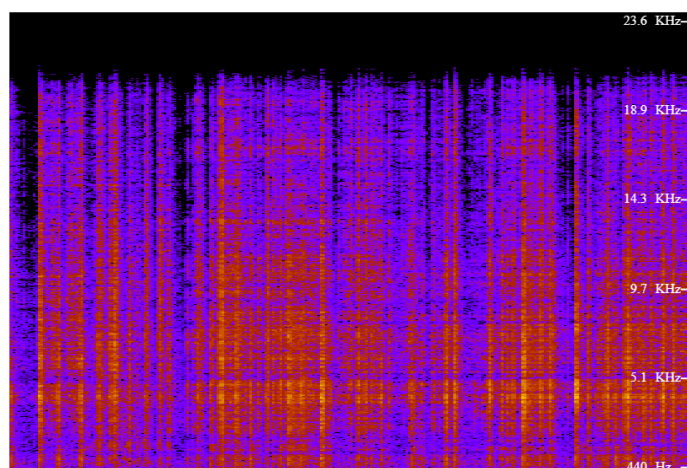


Elaboración propia (2026).

En contraste, el espectrograma asociado a la condición de potencia eléctrica elevada presenta una estructura más irregular en la distribución temporal de la energía (Figura 8). En este caso se observan patrones verticales repetidos que indican eventos sonoros más impulsivos y variaciones más abruptas en la señal. Este tipo de comportamiento sugiere una mayor inestabilidad en el proceso, lo cual se refleja en la aparición de transitorios más marcados y una mayor dispersión de energía en diferentes bandas de frecuencia.

Figura 8

Espectrograma correspondiente a la soldadura con potencia eléctrica elevada.

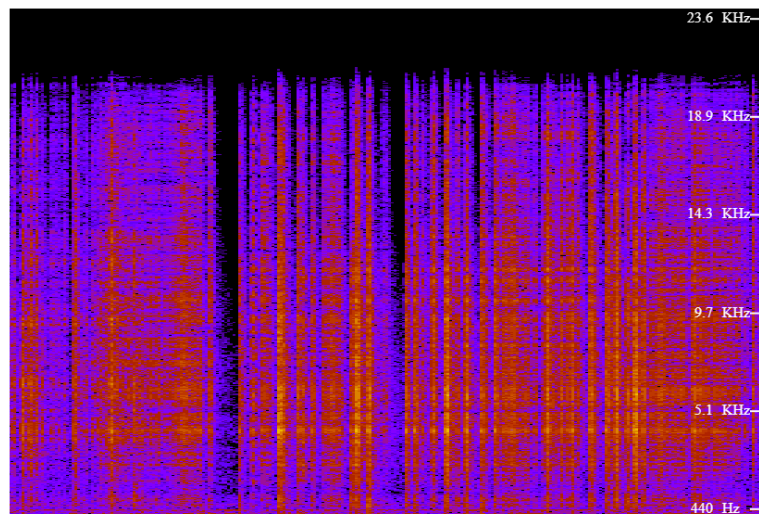


Elaboración propia (2026).

Por su parte, el espectrograma correspondiente a la condición de potencia eléctrica baja muestra una distribución menos uniforme de la energía sonora, con momentos donde la intensidad del sonido disminuye de manera notable antes de volver a incrementarse (Figura 9). Estas variaciones generan una estructura temporal más fragmentada en comparación con la soldadura óptima, lo cual coincide con la percepción auditiva de un proceso menos estable o con interrupciones parciales en el arco.

Figura 9

Espectrograma correspondiente a la soldadura con potencia eléctrica insuficiente.

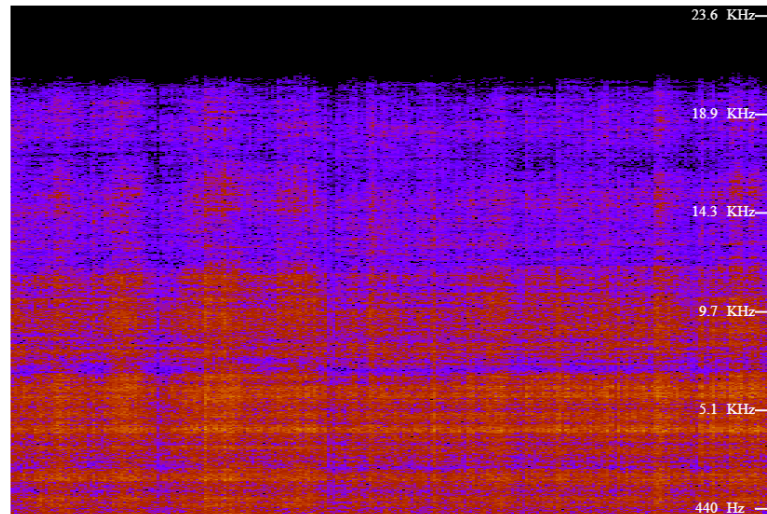


Elaboración propia (2026).

Finalmente, el espectrograma correspondiente a la condición de falta de gas presenta una textura visual considerablemente más dispersa a lo largo del espectro (Figura 10). En este caso puede observarse una mayor presencia de energía distribuida en distintas bandas de frecuencia de forma irregular, generando un patrón visual más desordenado en comparación con los otros casos analizados. Este comportamiento refleja la inestabilidad acústica que suele asociarse con este tipo de situación, donde la ausencia del gas de protección altera el comportamiento normal del arco eléctrico.

Figura 10

Espectrograma correspondiente a la soldadura con falta de gas.



Elaboración propia (2026).

Al comparar las distintas representaciones espectrales, puede observarse que algunas condiciones presentan similitudes generales pero se diferencian en características específicas del patrón acústico. En particular, la soldadura en condiciones óptimas y la situación de falta de gas muestran una distribución de energía relativamente continua en el tiempo, lo que puede generar cierta similitud visual inicial entre ambos espectrogramas. Sin embargo, mientras que en la soldadura óptima la energía se distribuye de forma más uniforme y estable, la condición de falta de gas presenta una mayor dispersión y variabilidad en distintas bandas de frecuencia, lo que produce una textura espectral más irregular. De manera similar, las condiciones de potencia eléctrica alta y potencia eléctrica baja comparten una estructura menos estable que la soldadura óptima, aunque difieren en la forma en que se manifiestan estas variaciones. En el caso de potencia alta se observan eventos sonoros más impulsivos y concentraciones de energía más marcadas, mientras que la potencia baja tiende a presentar interrupciones o disminuciones momentáneas en la intensidad del sonido. Estas diferencias, aunque sutiles en algunos casos, permiten identificar patrones característicos para cada situación de soldadura y

respaldan la premisa de que las fallas del proceso generan firmas acústicas distinguibles, las cuales constituyen la base del entrenamiento auditivo propuesto en el simulador.

Integración De Audio En El Simulador

Para la implementación del sistema de reproducción de sonidos dentro del simulador no se utilizó un middleware de audio especializado, siendo que se optó en su lugar por la integración directa mediante las herramientas de audio provistas por el motor de desarrollo Unity.

Esta decisión responde principalmente a la escala y complejidad del proyecto. Si bien los middleware de audio, como FMOD o Wwise, ofrecen sistemas avanzados para la gestión dinámica de sonido, su implementación introduce una capa adicional de configuración y aprendizaje que no resulta estrictamente necesaria para un simulador de alcance limitado como el desarrollado en este trabajo.

Dado que el comportamiento sonoro del simulador consiste principalmente en la reproducción de grabaciones preexistentes y en la transición entre distintos estados de audio que representan condiciones de funcionamiento de la soldadura, estas funcionalidades pudieron implementarse de manera directa mediante programación dentro del motor de desarrollo.

Sistema De Almacenamiento De Datos

Con el objetivo de registrar la información generada durante las sesiones de entrenamiento, el simulador implementa un sistema de almacenamiento basado en archivos en formato JSON (JavaScript Object Notation). La elección de este formato responde principalmente a criterios de simplicidad de implementación, portabilidad de los datos y facilidad para su posterior procesamiento.

El formato JSON es ampliamente utilizado en aplicaciones de software debido a su estructura ligera y fácilmente legible, tanto por sistemas informáticos como por usuarios

humanos. Esta característica permite almacenar información de manera organizada mediante estructuras jerárquicas simples, lo que resulta especialmente adecuado para registrar datos como identificadores de sesión, respuestas de los usuarios y tiempos de reacción. En el contexto de este simulador, la utilización de archivos JSON permitió implementar un sistema de registro funcional con un nivel relativamente bajo de complejidad técnica dentro del entorno de desarrollo utilizado.

Otro aspecto relevante que motivó esta elección es la facilidad para consolidar información proveniente de múltiples equipos. Dado que el simulador sería utilizado en diferentes computadoras dentro de un contexto educativo o experimental, cada instancia del programa genera sus propios archivos de registro. El uso de un formato estandarizado y ampliamente compatible como JSON facilita posteriormente la recolección de estos archivos y su integración en una base de datos común para el análisis de los resultados obtenidos durante las sesiones de entrenamiento.

Diseño De Interfaz De Usuario

El diseño de la interfaz del simulador fue planteado con un enfoque de simplicidad y claridad operativa, priorizando que los usuarios puedan comprender rápidamente el funcionamiento del sistema sin requerir un proceso de aprendizaje prolongado. Dado que el software está pensado para ser utilizado en contextos educativos o de capacitación, se buscó minimizar la cantidad de elementos visuales presentes en pantalla y reducir la complejidad general de interacción con el programa.

La estructura de navegación fue diseñada con pocos niveles jerárquicos, evitando recorridos excesivamente largos entre menús. Este enfoque responde a principios básicos del diseño de experiencia de usuario, donde se busca reducir la carga cognitiva del usuario, permitiendo que las personas comprendan rápidamente qué acciones pueden realizar dentro del sistema.

En términos de organización funcional, el sistema presenta una estructura de navegación relativamente lineal, en la que el usuario accede a las distintas funciones a través de una secuencia de pantallas definidas. Esta decisión responde principalmente a criterios de simplicidad en la implementación, ya que permitió reducir la complejidad de programación durante el desarrollo inicial del simulador. Dado el alcance exploratorio del proyecto, se priorizó la estabilidad del sistema y la correcta ejecución de las sesiones de entrenamiento por sobre la implementación de estructuras de navegación más complejas.

No obstante, esta arquitectura de navegación podría ampliarse en futuras versiones del software mediante la incorporación de esquemas de navegación más flexibles o no lineales, que permitan acceder a diferentes secciones del programa desde múltiples puntos de la interfaz. Este tipo de mejoras podría facilitar aún más la utilización del simulador en contextos educativos, permitiendo a instructores o usuarios alternar rápidamente entre sesiones de entrenamiento, revisión de resultados o configuración del sistema.

Otro aspecto considerado durante el diseño fue la claridad visual de los elementos interactivos. Estos fueron diseñados para ser fácilmente identificables y accesibles, utilizando tamaños adecuados y etiquetas claras que describen de manera directa la acción que ejecutan (ver Figuras 3-5). Este enfoque responde a principios de jerarquía visual y consistencia, ampliamente utilizados en diseño de interfaces, donde los controles deben ser visibles, comprensibles y previsibles en su funcionamiento.

Por otra parte, el simulador incorpora un sistema de registro y almacenamiento de datos de uso, lo que permite recopilar información sobre las sesiones realizadas por los usuarios. La interfaz fue diseñada considerando esta funcionalidad, permitiendo registrar y organizar grandes cantidades de datos asociados a las sesiones de entrenamiento. Esta característica resulta especialmente relevante en el contexto del presente trabajo, ya que facilita la posterior recopilación y análisis de información sobre el desempeño de los participantes.

Diseño De La Investigación

La investigación adopta una metodología cuantitativa, ya que se fundamenta en el análisis de datos numéricos relacionados al tiempo de respuesta ante estímulos auditivos y la precisión en la detección de fallas tanto con el simulador como con la soldadura real.

Desde el enfoque de sus objetivos, se trata de una investigación aplicada y explicativa. Es aplicada porque busca resolver un problema concreto dentro del ámbito de la capacitación técnica en soldadura MIG, y explicativa porque pretende comprender cómo influye el entrenamiento auditivo en la mejora del desempeño operativo.

En cuanto al tipo de inferencia, el estudio se inscribe dentro del modelo hipotético-deductivo: parte de dos hipótesis que plantean que el uso de un simulador con entrenamiento auditivo específico mejora la capacidad y velocidad de detección de fallas durante la soldadura.

Estas hipótesis fueron puestas a prueba en un entorno controlado, mediante el análisis de la evolución del desempeño del grupo a lo largo de 8 días por lo que, desde la perspectiva temporal, se adopta un diseño longitudinal.

La investigación responde a un enfoque cuasi-experimental, dado que el investigador tiene control parcial sobre las variables del estudio.

Por último y según el área de estudio, este trabajo se encuadra dentro de la investigación científica-industrial, ya que propone una solución tecnológica orientada a mejorar un proceso formativo técnico, aplicando herramientas propias del desarrollo de simuladores y entornos interactivos.

Métricas Y Datos Clave A Medir

Se utilizan las siguientes métricas cuantitativas para evaluar el impacto del simulador con entrenamiento auditivo en el proceso de formación de soldadores MIG.

- Cantidad de intentos llevados a cabo con el simulador.

- Tiempo de respuesta (latencia) ante sonidos que indiquen fallas técnicas (medido en milisegundos) dentro del simulador.
- Cantidad de aciertos en la identificación del origen de la falla en el simulador y frente a la soldadura real.

Población Y Muestra

La población objetivo está compuesta por personas jóvenes que no cuentan con experiencia previa en el campo de la soldadura y que no presentan problemas de audición.

Se trabajará con una muestra no probabilística intencional, compuesta por 6 personas ($N = 6$), las cuales son residentes de Las Parejas, Santa Fe, Argentina, una ciudad con gran presencia de industria metalúrgica. La muestra cuenta con representación de los géneros femenino ($N = 2$) y masculino ($N = 4$).

Criterios De Inclusión

- Tener entre 18 y 30 años.
- No presentar dificultades auditivas.
- No contar con experiencia previa en soldadura MIG.

Procedimiento

El experimento propuesto consta de 3 etapas diseñadas para llevar control de la evolución de la capacidad y, en segundo plano, velocidad de los alumnos para reconocer fallas en la soldadura.

En el primer encuentro, llevado a cabo en un establecimiento industrial de la ciudad de Las Parejas, se les dio a los participantes una breve charla introductoria sobre el funcionamiento de una soldadura MIG, para que tengan familiaridad con los conceptos propios de este rubro (tal como se ve en la Figura 11), como lo son la alimentación de alambre, el arco eléctrico, el voltaje y el flujo de gas, así como sus funciones. Concluida la charla, los participantes fueron expuestos a muestras del proceso de soldadura utilizando una máquina

modelo Blumig 500, operada por el investigador (ver Figura 12), y se reprodujeron casos con y sin fallas, siendo estos: (a) configuración óptima de las variables, (b) falta de gas, (c) baja potencia eléctrica y (d) alta potencia eléctrica. Terminados los casos de muestra, pasamos a las pruebas, donde a cada participante le fue entregada una hoja conteniendo una planilla en la cual debían indicar solo con escuchar el funcionamiento de la máquina si la soldadura reproducida por el investigador correspondía al caso de: (a) óptima, (b) falta de gas, (c) baja potencia, (d) alta potencia o, en su defecto, (e) no reconoce. Se reprodujeron 5 casos teniendo 4 únicos y 1 repetido en el siguiente orden: (c), (a), (d), (c), (b). Para estas pruebas los participantes fueron ubicados detrás del investigador, a una distancia de seguridad que les permita igualmente escuchar con claridad, dispuestos como se muestra en la Figura 13.

Figura 11

Soldador profesional explicando el funcionamiento de una soldadura MIG/MAG.



Fotografía propia (2026).

Figura 12

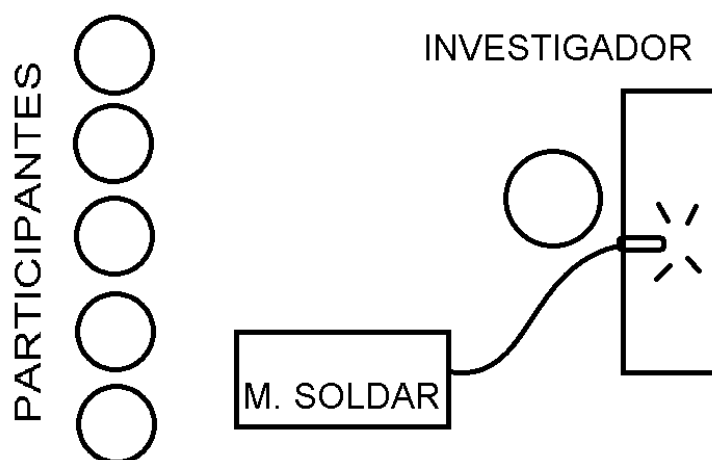
Investigador demostrando fallas en la soldadura.



Fotografía propia (2026).

Figura 13

Diagrama de disposición de los participantes durante las pruebas presenciales.



Elaboración propia (2026).

Terminadas las pruebas, a cada participante se le otorgó una copia digital del simulador para entrenamiento auditivo y se les pidió que lo utilicen a lo largo de una semana tantas veces como les sea factible. Los resultados de cada sesión fueron guardados automáticamente por el programa y recolectados por el investigador al concluir el período de uso.

Pasada una semana, el experimento concluyó con un encuentro presencial similar al del primer día, en el que se hizo un repaso de los sonidos con la soldadura real y luego se les entregó una segunda planilla a los participantes para que completen en cada caso replicado por el investigador, de qué falla consideraban que se trataba. En este encuentro, los casos se dieron en el orden: (c), (a), (b), (d), (b).

Análisis De Datos

Para el manejo de información se recopilaron los datos del simulador en un archivo json que posteriormente se trasladaron a una hoja de cálculo para facilitar el recuento estadístico y generar gráficos. Para las pruebas presenciales se recolectaron los datos en papel e igualmente se trasladaron luego a una hoja de cálculo para su análisis.

Resultados

Las primeras medidas tomadas para esta investigación se dieron fuera del grupo de análisis, ya que se quería corroborar la calidad del simulador desarrollado. Por esto, se convocaron a 3 soldadores profesionales y se les pidió realizar 10 intentos con el programa, teniendo de antemano solamente su experiencia personal. Con esto se obtuvo un total de 29 aciertos sobre 30 posibles y los convocados manifestaron que los sonidos fueron fieles a los que reproduce una máquina real, por lo que se prosiguió con el experimento.

En el día 1 de pruebas, se obtuvieron un total de 9 aciertos sobre 30 posibles, entre todos los participantes. Participante 1 (P1) obtuvo 2/5 aciertos, P2 obtuvo 0/5, P3 obtuvo 3/5, P4 obtuvo 2/5, P5 obtuvo 1/5 y P6 obtuvo 1/5. Esto representa un 30% de aciertos sin exposición al simulador. Transcurrida la semana de uso del programa y al repetir las pruebas, se obtuvo un total de 23 aciertos sobre 30 posibles. En esta ocasión, P1 obtuvo 5/5 aciertos, P2 obtuvo 4/5, P3 obtuvo 3/5, P4 obtuvo 5/5, P5 obtuvo 3/5 y P6 obtuvo 3/5. Esto representa un 76,66% de aciertos tras haber usado el simulador por una semana y por ende, una mejora del 46,66%.

Respecto a la detección de un cambio en el sonido, los participantes no demostraron problemas para presionar el botón a tiempo cuando el mismo se presentaba, siendo el peor de los casos, el del P1 que tuvo un 89% de detecciones correctas.

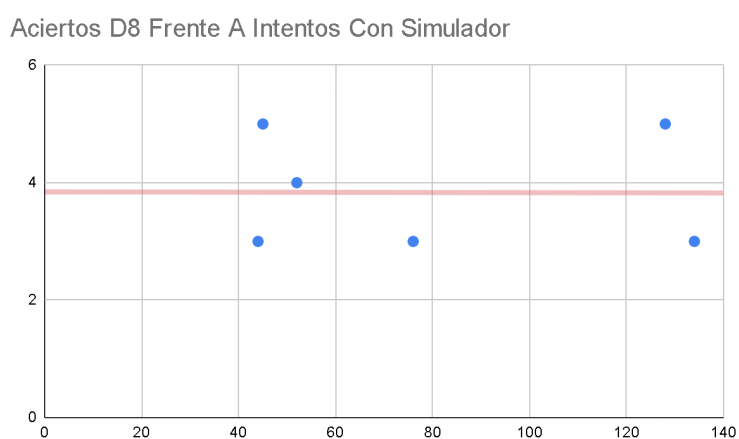
Dado que cada participante usó el simulador libremente, podemos comparar la cantidad de intentos guardados en el programa con la mejora porcentual individual que presentaron. P1 utilizó el simulador 128 veces y mostró una mejora del 60% (D1-40%, D8-100%), P2 utilizó el simulador 52 veces y mostró una mejora del 80% (D1-0%, D8-80%), P3 utilizó el simulador 76 veces y mostró una mejora del 0% (D1-60%, D8-60%), P4 utilizó el simulador 45 veces y mostró una mejora del 60% (D1-40%, D8-100%), P5 utilizó el simulador 44 veces y mostró una

mejora del 40% (D1-20%, D8-60%) y por último, P6 utilizó el simulador 45 veces y mostró una mejora del 40% (D1-20%, D8-60%).

Si bien las mejoras existen, no se observa que las mismas estén directamente relacionadas con la cantidad de intentos que cada alumno realizó con el simulador, según vemos en las Figuras 14 y 15.

Figura 14

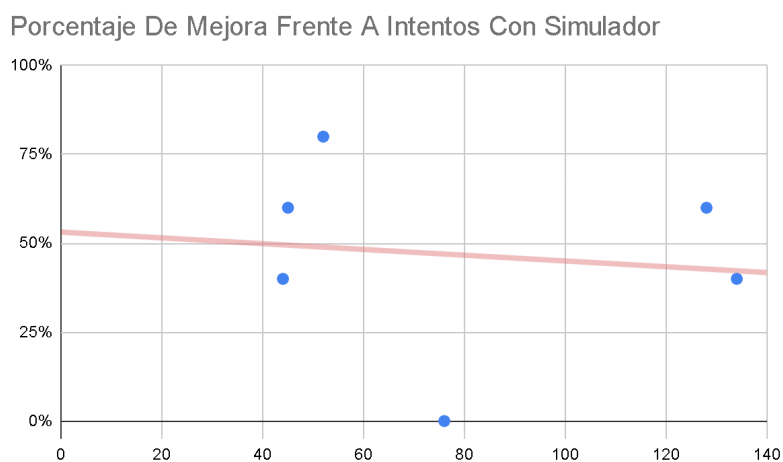
Relación entre aciertos en el día 8 frente a los intentos totales realizados con el simulador.



Elaboración propia (2026).

Figura 15

Relación entre porcentaje de mejora frente a los intentos totales realizados con el simulador.



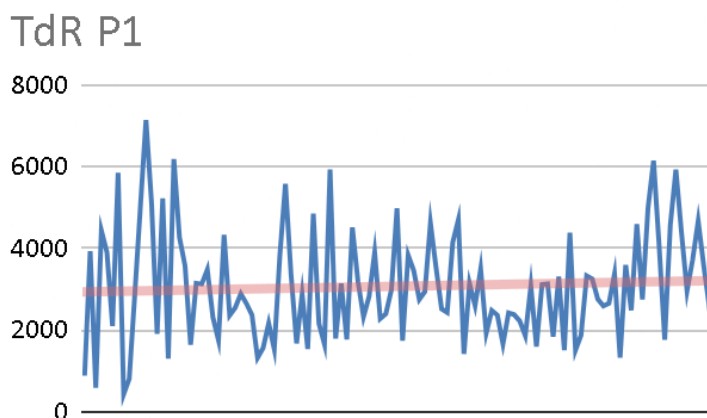
Elaboración propia (2026).

En cuanto a los porcentajes de aciertos con el simulador encontramos que P1 obtuvo un 79,69% de precisión (102/128 intentos correctos), P2 obtuvo un 69,23% de precisión (36/52 intentos correctos), P3 obtuvo un 43,42% de precisión (33/76 intentos correctos), P4 obtuvo un 53,33% de precisión (24/45 intentos correctos), P5 obtuvo un 50% de precisión (22/44 intentos correctos) y P6 obtuvo un 75,37% de precisión (101/134 intentos correctos).

Por último, los tiempos de detección muestran patrones heterogéneos entre participantes. Por ello se reporta, para cada caso, el tiempo promedio y la tendencia de cambio observada (véanse Figuras 3–8). El participante 1 presentó un tiempo medio de 3065 ms en 128 intentos, con una tendencia levemente ascendente. El participante 2 mostró un promedio de 2404 ms en 52 intentos y una tendencia levemente descendente. El participante 3 registró un promedio de 3709 ms en 76 intentos, con tendencia descendente. El participante 4 obtuvo un promedio de 5537 ms en 45 intentos, evidenciando una tendencia ascendente. El participante 5 presentó un promedio de 3041 ms en 44 intentos, con una tendencia marcadamente descendente. Finalmente, el participante 6 mostró un promedio de 3662 ms en 134 intentos y una tendencia marcadamente descendente.

Figura 16

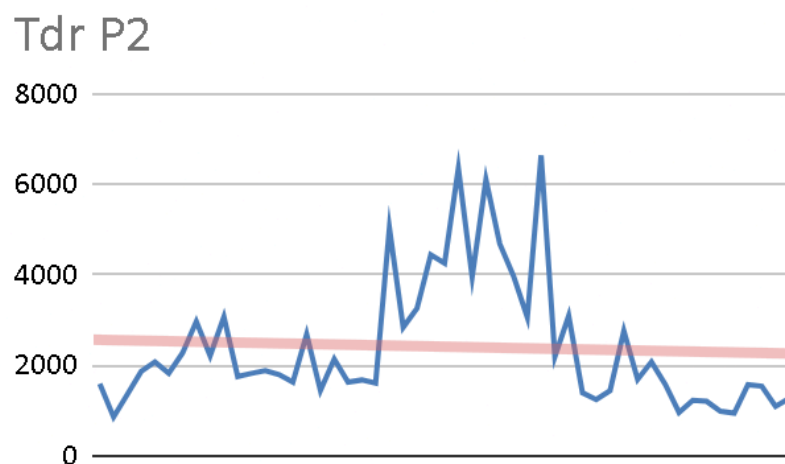
Evolución del tiempo de reacción del Participante 1.



Elaboración propia (2026).

Figura 17

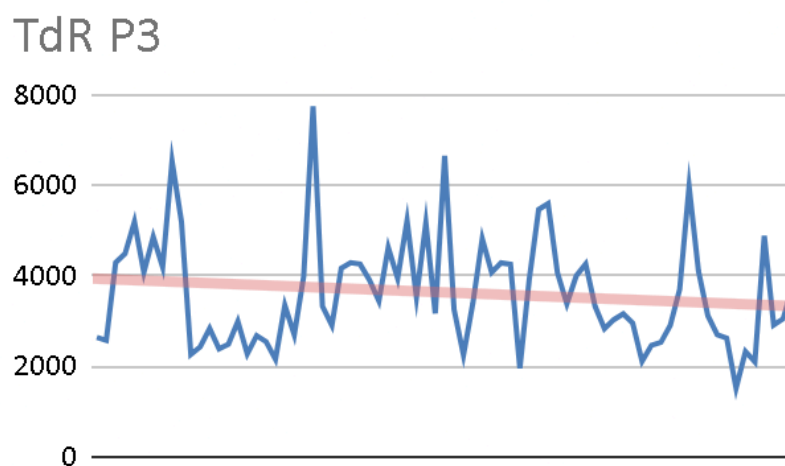
Evolución del tiempo de reacción del Participante 2.



Elaboración propia (2026).

Figura 18

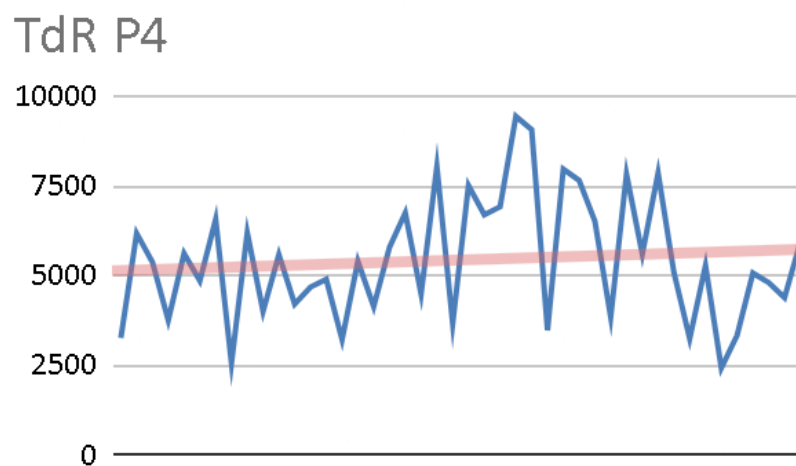
Evolución del tiempo de reacción del Participante 3.



Elaboración propia (2026).

Figura 19

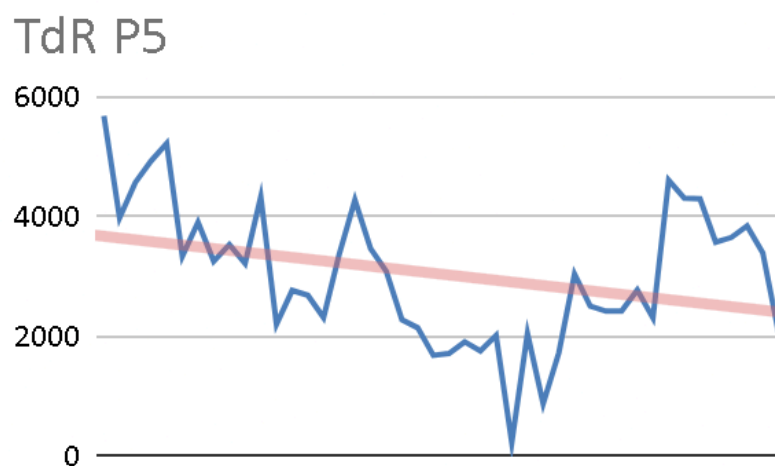
Evolución del tiempo de reacción del Participante 4.



Elaboración propia (2026).

Figura 20

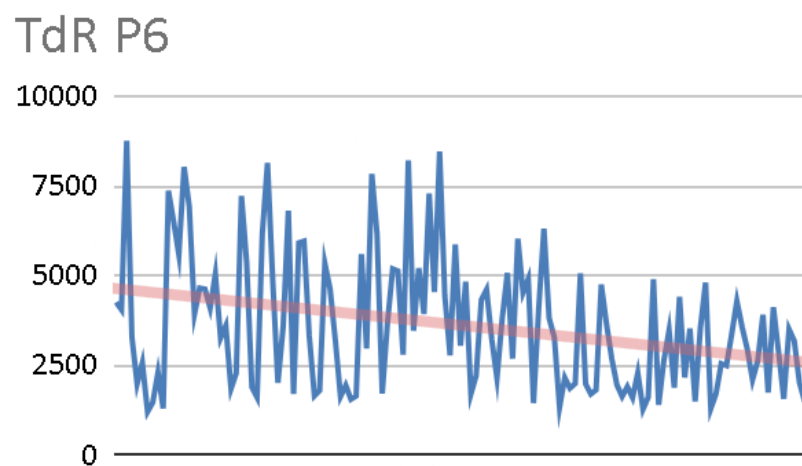
Evolución del tiempo de reacción del Participante 5.



Elaboración propia (2026).

Figura 21

Evolución del tiempo de reacción del Participante 6.



Elaboración propia (2026).

Discusión

Los resultados obtenidos a partir del experimento permiten afirmar que la implementación del simulador auditivo produjo una mejora significativa en la capacidad de los participantes para identificar el origen de fallas en soldadura MIG/MAG. La comparación entre los datos del día inicial y los del día final evidencia un progreso atribuible al uso del simulador, el cual constituyó la única instancia de exposición a los estímulos sonoros durante el período de entrenamiento. Si bien las mejoras no se manifestaron de manera homogénea en todos los participantes, el comportamiento general del grupo confirma la validez de la propuesta como herramienta de apoyo al aprendizaje perceptivo.

En este sentido, los resultados también sugieren que el aprendizaje auditivo no responde exclusivamente a la cantidad de práctica, sino a una combinación de factores individuales vinculados al procesamiento sensorial y a las estrategias cognitivas empleadas. No obstante, la exposición repetida a los estímulos demostró ser un facilitador clave en la adquisición de habilidades, particularmente en lo que respecta a la reducción de los tiempos de reacción frente a la aparición de fallas. Esta mejora en la velocidad de respuesta refuerza la utilidad del simulador como herramienta para entrenar no solo la identificación, sino también la eficiencia en la toma de decisiones en contextos técnicos.

A partir de estos resultados, el simulador se posiciona como una solución complementaria a los métodos tradicionales de formación, capaz de optimizar los procesos de capacitación mediante la incorporación de entrenamiento específico en habilidades perceptivas. En entornos productivos, donde la formación de personal implica tiempos prolongados, supervisión constante y costos asociados al uso de maquinaria y materiales, herramientas de este tipo permiten reducir la curva de aprendizaje sin comprometer recursos operativos. En este sentido, el simulador desarrollado puede entenderse como una herramienta de entrenamiento perceptivo de bajo costo operativo, alta repetibilidad y rápida implementación.

Asimismo, la validación del sistema con soldadores profesionales, quienes alcanzaron niveles de acierto cercanos al máximo y reconocieron la fidelidad de los estímulos auditivos, no solo respalda la calidad del simulador desarrollado, sino que también evidencia su capacidad para representar de manera precisa fenómenos del mundo real. El desempeño homogéneamente alto de estos participantes, en contraste con la variabilidad observada en los usuarios sin experiencia, sugiere además que la herramienta posee capacidad para discriminar distintos niveles de pericia en relación con la tarea. En este sentido, además de su utilidad como herramienta de aprendizaje, el simulador podría emplearse como recurso complementario para la evaluación objetiva de experiencia previa en contextos de selección de personal.

Más allá del caso específico de la soldadura, uno de los principales aportes de este trabajo radica en demostrar la viabilidad de diseñar simuladores centrados en canales sensoriales específicos, en este caso el auditivo, como eje del aprendizaje. Este enfoque permite transformar un conocimiento que tradicionalmente se adquiere a través de la experiencia prolongada en una habilidad entrenable de forma sistemática. A su vez, la lógica de desarrollo implementada —basada en la captura, procesamiento e integración de estímulos acústicos en entornos interactivos— resulta adaptable a distintos dominios técnicos donde el sonido cumple un rol crítico en la detección de anomalías o eventos relevantes.

Esta característica introduce un potencial de escalabilidad significativo, habilitando el desarrollo de soluciones que pueden ajustarse a diferentes contextos, niveles de complejidad y necesidades formativas. Desde entornos industriales hasta aplicaciones en mantenimiento técnico o áreas vinculadas a la salud, la posibilidad de entrenar habilidades perceptivas de manera controlada, repetible y sin riesgos operativos abre oportunidades concretas para mejorar la eficiencia y la calidad en los procesos de capacitación.

Por último, si bien el estudio presenta limitaciones relacionadas con el tamaño de la muestra, la falta de control sobre las condiciones de práctica y la variabilidad interindividual, los resultados obtenidos constituyen una base sólida para futuras investigaciones. La incorporación de muestras más amplias, protocolos de entrenamiento estandarizados y nuevas métricas de evaluación permitirá profundizar en la comprensión del aprendizaje auditivo y ampliar el alcance de este tipo de herramientas.

En conjunto, este trabajo no solo valida una hipótesis específica dentro del campo de la soldadura, sino que propone un enfoque aplicable al desarrollo de nuevas soluciones de simulación orientadas a optimizar la formación técnica. En este marco, la simulación centrada en el entrenamiento sensorial se posiciona como una línea de desarrollo con potencial para redefinir la manera en que se adquieren habilidades en distintos sectores productivos.

Referencias

- Alfaro-Viquez, D., Zamora-Hernandez, M., Fernandez-Vega, M., Garcia-Rodriguez, J., y Azorin-Lopez, J. (2025). Integrating Virtual Reality into Welding Training: An Industry 5.0 Approach. *Electronics*, 14(10), 1964. <https://doi.org/10.3390/electronics14101964>
- Brown, R. M., y Penhune, V. B. (2018). Efficacy of Auditory versus Motor Learning for Skilled and Novice Performers. *Journal Of Cognitive Neuroscience*, 30(11), 1657-1682. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01309
- Chermak, G. D., & Musiek, F. E. (2013). *Handbook of Central Auditory Processing Disorder, Volume II, Second Edition: Comprehensive Intervention*. Plural Publishing.
- Cullen, M. (2023). *Development of a Smart Gas Metal Arc Welding System Using Acoustic Sensing - ProQuest*. <https://www.proquest.com/openview/1ee2004bedc10f0c206ecec0d67c7be/1?cbl=2026366&diss=y&pq-origsite=gscholar>
- De Götzen, A., Magnusson, C., y Castagne, N. (2014). *Auditory feedback in VR and HCI*. https://www.academia.edu/97240437/Auditory_feedback_in_VR_and_HCI
- Giordano, M. C., & Mancilla, M. G. (2018). *Generación y fortalecimiento de capacidades laborales* [Proyecto de grado, Universidad de la Defensa Nacional, Centro Regional Universitario Córdoba – IUA]. <https://rdu.iaa.edu.ar/handle/123456789/2217>
- Lu, X. (2016). The effects of sound and priming on user safety decisions in virtual construction simulators. En *UNSWWorks (University of New South Wales, Sydney, Australia)*. <https://doi.org/10.26190/unsworks/19256>
- Lv, N., Xu, Y., Li, S., Yu, X., y Chen, S. (2017). Automated control of welding penetration based on audio sensing technology. *Journal Of Materials Processing Technology*, 250, 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.005>

Prettyman A. Perceptual learning. *WIREs Cogn Sci*. 2019;10:e1489.

<https://doi.org/10.1002/wcs.1489>

Schacter, D. L., & Addis, D. R. (2007). The cognitive neuroscience of constructive memory: remembering the past and imagining the future. *Philosophical Transactions Of The Royal Society B Biological Sciences*, 362(1481), 773-786.

<https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2087>

Singer, N., y Zaltz, Y. (2025). Auditory Learning and Generalization in Older Adults: Evidence from Voice Discrimination Training. *Trends In Hearing*, 29.

<https://doi.org/10.1177/23312165251342436>

Teaching Heart Auscultation to Health Professionals: Methods for Improving the Practice of an Ancient But Critical Skill. (2011).

Weman, K. y Lindén, G. (2006). *MIG welding guide*. Woodhead Publishing.

https://www.academia.edu/74119261/MIG_Welding_Guide

White, S. A., Prachyabrued, M., Chambers, T. L., Borst, C. W., y Reiners, D. (2010). Low-cost simulated MIG welding for advancement in technical training. *Virtual Reality*, 15(1),

69-81. <https://doi.org/10.1007/s10055-010-0162-x>

Anexo

Enlace a la hoja de datos con resultados del simulador

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1qPGPtR6vFqLYE93S0HA41SATmYiprGofmuptHgrJNA0/edit?gid=2051167917#gid=2051167917>

Enlace a copia de consentimiento informado

<https://docs.google.com/document/d/137netWpKQUjdDN9tMXhLgui3Me848ws4a5CsyuOhmzg/edit?tab=t.0>

Enlace a video sobre demostración de uso de SEADFS

<https://youtu.be/2mpRNEeMUVU?si=Z8soRLeXUhutW1rm>

Enlace a video resumen del experimento

<https://youtu.be/HCR2ZurEpwI?si=VymdQCNXB-SZVcGv>