



Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli

Organismo Público Descentralizado del Estado de México

MAESTRÍA EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN

“*Creación de SGR (Staff Grounding Recorder)*”

TESIS

MAESTRÍA EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION

PRESENTA:

FRANCISCO JAVIER REYES REYES

ASESORA:

MTRA. ELVA BERNAL RODRIGUEZ

“ Creación del SGR (Staff Grounding Recorder)”

AUTORIZACIÓN

AGRADECIMIENTOS

La vida está llena de pequeños momentos que muchas veces pasan desapercibidos: una sonrisa inesperada, una palabra de aliento en el día justo, el aroma del café por la mañana o el abrazo cálido al final de una jornada. Son esas pequeñas cosas, simples y cotidianas, las que sin darnos cuenta construyen el tejido de nuestra historia y nos impulsan a seguir adelante, incluso cuando no sabemos qué nos depara el futuro.

Es increíble cómo, sin previo aviso, llegan esos grandes momentos que marcan un antes y un después en nuestro camino. Momentos que nos llenan el corazón de alegría, gratitud y esperanza, y que solo podemos valorar plenamente cuando miramos atrás y vemos cuánto hemos crecido.

En ese espíritu, quiero dedicar mi más profundo agradecimiento a mis padres, por ser ese refugio constante de amor y fortaleza, por enseñarme con su ejemplo la importancia de la perseverancia y la humildad. A mis hijos, quienes son mi fuente inagotable de inspiración y me recuerdan cada día que la vida siempre guarda sorpresas maravillosas para quienes se atreven a soñar.

A mis hermanos, por estar siempre a mi lado, compartiendo risas, apoyo y momentos que se convierten en recuerdos imborrables. Y con mucho cariño, a mis profesores, quienes con paciencia, pasión y dedicación han sembrado en mí el conocimiento y la confianza para enfrentar nuevos retos.

Con especial gratitud, reconozco al **Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli**, por brindarme no solo las herramientas técnicas, sino también el entorno humano y académico para crecer como profesional y como persona. Su compromiso con la excelencia educativa es un pilar fundamental para el desarrollo de talento mexicano con visión global.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento al **Estado de México**, por ser cuna de oportunidades, esfuerzo e innovación. Desde esta tierra nace esta tesis, y con ella, una propuesta tecnológica hecha en México, con orgullo, para el mundo.

Gracias a todos ustedes, porque sin su amor, guía y compañía, estos grandes momentos no habrían llegado jamás. Y gracias a ustedes hoy presento esta tesis como parte fundamental de mi Maestría en Tecnologías de la Información.

DEDICATORIA

En el transcurso de la vida, son las experiencias cotidianas —esas pequeñas acciones y momentos triviales— las que van formando nuestro camino y definiendo quiénes somos. Desde mi formación en robótica industrial, donde aprendí a enfrentar retos técnicos y a encontrar soluciones creativas, surgió en mí el deseo de seguir creciendo y profundizando mis conocimientos, lo que me llevó a emprender esta Maestría en Tecnologías de la Información.

Este trabajo no solo representa un logro académico, sino también la culminación de un proceso lleno de aprendizaje, esfuerzo y transformación personal. Ha sido un camino de descubrimientos, retos y crecimiento, acompañado siempre por el apoyo y el amor de quienes han estado a mi lado.

Con todo mi cariño y gratitud, dedico esta tesis a mis padres, quienes con su amor incondicional y guía han sido mi pilar fundamental; a mis hijos, fuente constante de inspiración y alegría que me motivaron a seguir adelante sin importar las dificultades; y a mis hermanos, por su compañía y apoyo constante en este viaje.

A todos ellos les agradezco porque los grandes momentos llegan sin aviso, y es en esos instantes, pequeños y valiosos, donde encuentro la fuerza para seguir avanzando y alcanzar mis sueños.

ÍNDICE

RESUMEN	12
CAPÍTULO 1. MARCO CONTEXTUAL	14
Estado del Arte.....	15
1.1.1 Estado del Arte del Proyecto SGR (Staff Grounding Recorder)	15
1.1.2 Antecedentes y Evolución de los Medidores de Puesta a Tierra	15
1.1.3 Tecnología de Microcontroladores y Sensores en Sistemas de Medición	15
1.1.4 Aplicaciones y Beneficios de Sistemas Digitales de Medición de Puesta a Tierra	16
1.1.5 Normativas y Estándares de Seguridad en Puesta a Tierra	16
1.1.6 Innovaciones y Tendencias Futuras en Medición de Puesta a Tierra	16
Planteamiento del Problema.	17
Justificación	18
Objetivo General	19
1.4.1 Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	20
Introducción	21
Descargas Electrostáticas (ESD)	22
2.2.1 Definición y Fundamentos Físicos del ESD	22
2.2.2 Causas del ESD	23
2.2.3 Efectos del ESD	24
Normativas y Estándares de ESD: ANSI/ESD S20.20	26
2.3.1 Importancia de los Estándares ESD	26
2.3.2 Pautas para la Implementación de Programas de Control de ESD según ANSI/ESD S20.20	26
2.3.3 Relevancia del Estándar ANSI/ESD S20.20	30
Validación de Calzado en Áreas ESD	30

2.4.1 Importancia de la Puesta a Tierra del Personal	30
2.4.2 Métodos de Medición de la Puesta a Tierra del Calzado	32
2.4.3 Importancia de la Medición Adecuada.....	33
Antecedentes de Medidores de Puesta a Tierra.....	34
Tecnologías y Componentes Utilizados en el SGR	35
2.6.1 Historia de los Microcontroladores	35
2.6.2 Microcontrolador ESP32 y su utilización en Sistemas Embebidos.....	37
2.6.3 Programación de Dispositivos y Desarrollo de Firmware.....	39
2.6.4 Lector de Huellas Dactilares (UART).....	40
Bases de Datos y Uso de SQLite	41
2.7.1 Concepto de Base de Datos.....	41
2.7.2 Tipos de Bases de Datos	42
2.7.3 SQLite: Definición y Características	42
2.7.4 Ventajas de Utilizar SQLite.....	43
2.7.5 Uso de SQLite en Aplicaciones Embebidas y Sistemas Locales	44
Aplicaciones y Beneficios de un Sistema de Medición y Control ESD	45
Conclusión del Marco Teórico	47
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO	48
Marco Metodológico: Enfoque Híbrido de Waterfall, Agile y Prototipado Rápido	49
3.1.1 Introducción al Marco Metodológico	49
Fase 1: Investigación y Definición de Requisitos (Waterfall).....	51
Fase 2: Prototipado Rápido Inicial (Prototipado Rápido + Agile)	52
3.1.2 Fase 3: Evaluación y Retroalimentación (Agile)	53
3.1.3 Iteración y Retroalimentación Continua.....	55
3.1.4 Herramientas y Técnicas Empleadas	55
3.1.5 Conclusión del Enfoque Metodológico	55
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	56

Fase 1: Investigación y Definición de Requisitos (Waterfall).....	57
4.1.1 Revisión de literatura sobre tecnologías de medición de puesta a tierra y seguridad ESD – Hallazgos clave aplicables al SGR:.....	58
4.1.2 Análisis y definición de las normativas ESD – Puntos clave aplicables al SGR:	59
4.1.3 Identificación de tecnologías biométricas – Hallazgos clave aplicables al SGR.....	59
4.1.4 Definición de requisitos técnicos y componentes electrónicos:.....	62
4.1.5 Boceto de diagramas a nivel usuario:.....	63
Actores en el Diagrama de Casos de Uso:.....	63
4.1.6 Bocetos de Interfaz de Usuario:	68
Fase 2: Prototipado Rápido Inicial (Prototipado Rápido + Agile)	72
Objetivo: 72	
4.2.1 Selección de Herramientas y Preparación del Entorno.....	73
4.2.2 Conexión de los Módulos al ESP32	73
4.2.3 Diseño de la Estructura de Conexión	75
4.2.4 Programación Inicial del Sistema	76
4.2.5 Módulo de Medición de Resistencia de Puesta a Tierra (ESP32 + SGM58031)	77
4.2.6 Módulo de Autenticación Biométrica (AS608)	79
4.2.7 Módulo de RTC (DS1307).....	83
4.2.8 Base de Datos (SQLite)	84
4.2.9 Módulo de SD (Tarjeta SD)	85
4.2.10 Módulo de Pantalla LCD 16x4	86
4.2.11 Validación de la Conexión de los Módulos	87
4.2.12 Interfaz de Usuario (Entorno Real)	89
Fase 3: Evaluación y Retroalimentación (Agile)	96
4.3.1 Actividades Realizadas	97
4.3.2 Método Aplicado	98
Fase 4: Desarrollo Integral y Refinamiento (Waterfall + Agile).....	99

4.4.1 Actividades Realizadas	100
CAPÍTULO 5.....	101
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	101
5.1 Conclusiones.....	102
5.2 Perspectivas para trabajos futuros	103
Conclusión final.....	104
REFERENCIAS.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Descarga Electroestica	22
Figura 2 Modelo-cuerpo-humano-HBM.....	23
Figura 3 Daño al componente por ESD	25
Figura 4 ESD ASSOCIATION.....	26
Figura 5 Medición a Tierra	33
Figura 6 Medidor Convencional.....	34
Figura 7 Intel 4004.....	35
Figura 8 Motorola 68HC11	35
Figura 9 MSP430	36
Figura 10 ESP32 de última generación.....	37
Figura 11 Chip con Firmware	39
Figura 12 AS608.....	40
Figura 13 Base de Datos SQL.....	41
Figura 14 Logo SQL.....	42
Figura 15 Conexion SQL.....	44
Figura 16 Medotoflogia Waterfall	49
Figura 17 Metodologia Agile.....	50
Figura 18 AS608 con accesorios.....	61
Figura 19 Diagrama de casos de uso.....	63
Figura 20 Diagrama de Clases.....	65
Figura 21 Diagrama ER	66
Figura 22 Pantalla Login.....	68
Figura 23 Pantalla Inicio	69

Figura 24 Pantalla de Registros.....	69
Figura 25 Pantalla de Nuevo ID.....	70
Figura 26 Pantalla de Usuarios	70
Figura 27 Pantalla de Configuraciones	71
Figura 28 ID arduino	73
Figura 29 Esquema de la interacción de un sistema de medición biometrico	74
Figura 30 Prototipo Inicial SGR.....	75
Figura 31 ADC SGM58031	77
Figura 32 Lector Biometrico	79
Figura 33 RTC Microchip	83
Figura 34 Base de Datos SQL.....	84
Figura 35 SD.....	85
Figura 36 LCD 20x4.....	86
Figura 37 Pestaña Inicio	90
Figura 38 Pestaña Registros	91
Figura 39 Pestaña Nuevo Usuario.....	92
Figura 40 Pestaña Usuarios	93
Figura 41 Pestaña Desarrollador	95

LISTA DE ABREVIATURAS Y TABLA DE SÍMBOLOS

SGR:	Staff Grounding Recorder (Registrador de Puesta a Tierra del Personal)
ESD:	Electrostatic Discharge (Descarga Electrostática)
ESP32:	Espressif Systems Processor 32 (Procesador de Espressif Systems)
HTML:	HyperText Markup Language (Lenguaje de Marcado de Hipertexto)
CSS:	Cascading Style Sheets (Hojas de Estilo en Cascada)
C++:	Programming Language (Lenguaje de Programación C++)
IDE:	Integrated Development Environment (Entorno de Desarrollo Integrado)
AS608:	Fingerprint Sensor (Sensor de Huella Digital AS608)
RTC:	Real-Time Clock (Reloj en Tiempo Real)
UART:	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal)
SPI:	Serial Peripheral Interface (Interfaz Periférica Serial)
I2C:	Inter-Integrated Circuit (Circuito Integrado de Comunicación)
LCD:	Liquid Crystal Display (Display de Cristal Líquido)
SD:	Secure Digital (Tarjeta de Memoria)
ISO:	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)

RESUMEN

En el dinámico y desafiante entorno industrial, donde los riesgos de descargas electrostáticas (ESD) pueden comprometer tanto la seguridad del personal como la integridad de equipos electrónicos vitales, la implementación de sistemas de protección efectivos es más que una necesidad: es una obligación. Esta tesis presenta el **Staff Grounding Recorder (SGR)**, una solución revolucionaria que utiliza el potente **microcontrolador ESP32** para ofrecer una medición precisa y un registro confiable de la resistencia de puesta a tierra del personal, alineado con la normativa ANSI ESD 2020.

El SGR no solo es una herramienta de medición, sino que integra tecnología biométrica avanzada a través del lector de huella digital **AS608**, permitiendo la identificación segura de los empleados y la gestión eficiente de sus registros. Gracias al uso de un **ohmímetro digital**, conectado al **ADC del ESP32**, el sistema ejecuta mediciones precisas de la resistencia a tierra, con configuraciones completamente ajustables para cumplir con los estándares de ESD más exigentes. Los datos recopilados se almacenan en una base de datos segura y son accesibles de manera instantánea a través de una interfaz web intuitiva, que permite a los administradores consultar tanto mediciones históricas como en tiempo real de forma sencilla y protegida.

Este innovador sistema no solo eleva los estándares de seguridad laboral, garantizando un entorno de trabajo libre de riesgos ESD, sino que optimiza la gestión operativa mediante la generación de métricas fiables que permiten evaluar y mejorar la efectividad de las prácticas de puesta a tierra. Además, el SGR abre la puerta a futuras integraciones con sistemas de gestión de calidad certificados como ISO 9001:2015, posicionándose como una herramienta clave en la mejora continua de la seguridad industrial.

Con esta propuesta, esta tesis no solo resuelve problemas críticos en el presente, sino que también establece las bases para una expansión hacia soluciones más integradas, eficientes y de mayor alcance en el futuro.

INTRODUCCIÓN

En un entorno donde la eficiencia y la seguridad son fundamentales, la optimización de recursos se convierte en una meta ineludible. En la gestión de entornos con riesgos electroestáticos, como aquellos regulados por la normativa ANSI ESD 2020, la implementación de sistemas digitales se vuelve esencial. En particular, el SGR (Staff Grounding Recorder) surge como una solución innovadora diseñada para medir y registrar la resistencia de puesta a tierra del personal, garantizando así la protección contra descargas electrostáticas en áreas críticas de trabajo.

Desarrollado sobre la plataforma ESP32, el SGR no solo cumplirá con los rigurosos estándares de seguridad ESD, sino que también optimizará la gestión de registros y mediciones. A través de su interfaz web, que incluirá funciones como enrolamiento de empleados, registro de huellas digitales, y visualización detallada de registros de medición, el sistema proporcionará una herramienta integral para la prevención y el cumplimiento normativo.

Este proyecto no solo aborda la necesidad de cumplir con las normativas de seguridad actuales, sino que también promueve una gestión eficiente del riesgo ESD, crucial para entornos industriales y de alta tecnología. A continuación, se detallan las características técnicas y funcionales del SGR, así como las futuras expansiones previstas para mejorar aún más su utilidad y versatilidad en el campo.

CAPÍTULO 1.

MARCO CONTEXTUAL

Estado del Arte

1.1.1 Estado del Arte del Proyecto SGR (Staff Grounding Recorder)

“El transcurso del día a día está lleno de actividades, las cuales la mayoría de ellas generan energía estática de forma continua y los entornos industriales no están exentos de verse expuestos ante dicha energía, lo cual puede resultar peligroso en ambientes donde una descarga por energía electrostática, por más pequeña que esta sea puede resultar perjudicial para los productos o procesos que se realicen.”

1.1.2 Antecedentes y Evolución de los Medidores de Puesta a Tierra

Los medidores de puesta a tierra han sido herramientas críticas para la evaluación y el mantenimiento de la seguridad eléctrica en entornos industriales y comerciales desde hace décadas. Inicialmente, estos dispositivos se basaban en tecnologías analógicas simples que medían la resistencia de puesta a tierra de manera manual. Con el tiempo, la demanda de mediciones más precisas y automatizadas impulsó la evolución hacia sistemas digitales que integran microcontroladores y sensores avanzados.

La transición hacia medidores digitales ha permitido no solo una medición más precisa, sino también la capacidad de registrar y analizar datos de manera continua, proporcionando información valiosa para la gestión proactiva de la puesta a tierra y la prevención de descargas electrostáticas (ESD).

1.1.3 Tecnología de Microcontroladores y Sensores en Sistemas de Medición

La integración de microcontroladores como el ESP32 en sistemas de medición de puesta a tierra representa un avance significativo en la automatización y precisión de estas mediciones. El ESP32, por ejemplo, ofrece capacidades avanzadas de procesamiento de datos y comunicación inalámbrica, lo que permite la captura de datos en tiempo real y la generación de informes automatizados.

La programación del ESP32 utilizando herramientas como Arduino IDE simplifica el desarrollo de firmware personalizado para adaptarse a las necesidades específicas del SGR. Esto incluye la configuración óptima del ADC integrado para mediciones precisas de resistencia de puesta a tierra y la implementación de algoritmos de filtrado de señales para mejorar la exactitud de los datos obtenidos.

1.1.4 Aplicaciones y Beneficios de Sistemas Digitales de Medición de Puesta a Tierra

Los sistemas digitales como el SGR ofrecen múltiples beneficios en entornos industriales, donde la gestión eficaz de la puesta a tierra es crucial para la seguridad y operación de equipos electrónicos sensibles. Estos beneficios incluyen la capacidad de realizar mediciones continuas y automáticas, la generación de informes detallados sobre el estado de la puesta a tierra y la mejora en la trazabilidad de registros para auditorías de cumplimiento normativo.

Además, la implementación del SGR optimiza recursos al reducir el tiempo dedicado a la supervisión manual de la puesta a tierra y al permitir una respuesta más rápida ante problemas potenciales. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce los costos asociados con mantenimientos correctivos por fallos causados por ESD.

1.1.5 Normativas y Estándares de Seguridad en Puesta a Tierra

La normativa ANSI ESD 2020 establece requisitos específicos para la gestión de descargas electrostáticas, incluyendo límites de resistencia de puesta a tierra que deben cumplirse para proteger equipos electrónicos sensibles. La implementación del SGR facilita la conformidad con estas normativas al proporcionar mediciones precisas y registros detallados que pueden ser auditados y certificados por organismos reguladores. La certificación según estándares como ISO 9001:2015 es alcanzable con la implementación del SGR, asegurando que los procesos de gestión de puesta a tierra cumplan con estándares internacionales reconocidos y contribuyan a la mejora continua en la seguridad y calidad de los procesos industriales.

1.1.6 Innovaciones y Tendencias Futuras en Medición de Puesta a Tierra

La continua evolución en la medición de puesta a tierra incluye el desarrollo de sensores más sensibles, sistemas de análisis de datos avanzados y la integración con plataformas IoT para una gestión aún más eficiente y predictiva. Las tendencias futuras apuntan hacia la mejora en la precisión de las mediciones, la optimización del consumo energético y la interoperabilidad con sistemas de gestión de la producción y mantenimiento.

Planteamiento del Problema.

En el contexto de la protección contra descargas electrostáticas (ESD), es esencial garantizar que el calzado utilizado por el personal cumpla con los requisitos normativos establecidos para prevenir posibles daños a los equipos sensibles y para la seguridad de los trabajadores. Actualmente, en una empresa de reparación de tarjetas electrónicas se emplea un dispositivo manual para medir la resistencia eléctrica del calzado de los empleados, el cual consta de una lámina en la que el trabajador debe colocarse y tocar un botón metálico para cerrar el circuito y obtener la medición correspondiente. No obstante, este sistema presenta una serie de deficiencias que afectan la fiabilidad, la trazabilidad y la conformidad con las normativas aplicables.

Uno de los principales riesgos son los errores humanos y la posible falsificación de resultados. Se han registrado incidentes en los que los empleados firman la hoja de registro sin haber superado la medición de manera satisfactoria, lo cual pone en duda la veracidad de los datos recopilados y la efectividad del control de cumplimiento.

Otro problema importante es la ausencia de trazabilidad y soporte para auditorías. El sistema actual no proporciona una infraestructura adecuada para almacenar de manera segura y accesible los registros de medición, lo que dificulta la verificación de la información durante procesos de auditoría interna o externa. La falta de un sistema de trazabilidad electrónica limita la capacidad de garantizar la integridad de los datos y su disponibilidad para futuras revisiones, lo que contraviene los principios de documentación y validación requeridos por las normativas de seguridad y calidad.

Por último, la ineficiencia en la gestión y análisis de datos es una consecuencia directa de la dependencia de registros manuales. Estos deben ser completados y archivados de forma física, lo que genera dificultades en el análisis y la revisión de la información histórica. La falta de automatización en la recolección y almacenamiento de datos impide una gestión eficiente, dificultando la evaluación de tendencias o la toma de decisiones basadas en el seguimiento de las mediciones a lo largo del tiempo.

Además, la vulnerabilidad a manipulaciones de los registros es una preocupación, ya que la ausencia de un sistema automatizado y de verificación adicional incrementa la posibilidad de alteraciones en los datos, lo que compromete la fiabilidad del proceso de medición y puede generar riesgos para la seguridad laboral. La falta de un control adecuado sobre los registros también dificulta la identificación de inconsistencias o irregularidades en los datos obtenidos.

Justificación

En el contexto de entornos industriales regulados por normativas estrictas como ANSI ESD 2020, la gestión efectiva de la puesta a tierra del personal y la protección de equipos electrónicos son fundamentales para garantizar la seguridad y la eficiencia operativa. Actualmente, la empresa enfrenta desafíos significativos relacionados con la falta de un sistema integral que asegure la precisión y la confiabilidad en las mediciones de resistencia de puesta a tierra.

La implementación del sistema SGR (Staff Grounding Recorder) se justifica como una solución crítica para optimizar estos procesos. En lugar de los métodos convencionales propensos a errores humanos y manipulación, el SGR integra un lector biométrico de alta precisión que asegura la autenticidad y la precisión de los datos almacenados de manera inequívoca. Esto no solo mejora la seguridad del personal y la integridad de los equipos, sino que también facilita el cumplimiento de normativas y certificaciones como ISO 9001:2015 y ANSI ESD 2020.

La necesidad de este sistema se fundamenta en la mejora continua de las prácticas de seguridad ESD y la optimización de recursos. Actualmente, la falta de métricas confiables dificulta la evaluación precisa del rendimiento del calzado de protección asignado al personal, así como la planificación efectiva de mantenimiento preventivo para equipos críticos. Con la implementación del SGR, se espera automatizar y agilizar estos procesos, reduciendo tiempos, procesos y costos asociados con la gestión manual.

En resumen, este proyecto no solo abordará los desafíos actuales en la gestión de la puesta a tierra, sino que también posicionará a la empresa como líder en la implementación de prácticas seguras y eficientes en entornos industriales regulados. La investigación detallará el enfoque metodológico utilizado para implementar y evaluar el SGR, proporcionando una base sólida para mejorar continuamente nuestras operaciones y fortalecer nuestras capacidades competitivas en el mercado.

Objetivo General

Desarrollar el prototipo del sistema SGR (Staff Grounding Recorder) para optimizar la gestión de la puesta a tierra en una empresa, asegurando la precisión y fiabilidad de las mediciones conforme a las normativas ANSI ESD 2020, mediante la integración de tecnologías biométricas y sistemas electrónicos, con el fin de ofrecer una solución eficiente para el control y seguridad ESD.

1.4.1 Objetivos Específicos

1. Seleccionar y configurar los componentes del sistema SGR, incluyendo el hardware adecuado, el firmware del ESP32, el sensor biométrico y el módulo RTC, para asegurar mediciones precisas y la captura de datos relevantes de los empleados.
2. Desarrollar e implementar una plataforma de gestión web que permita visualizar y almacenar de manera segura los registros de mediciones, integrando mecanismos de seguridad para proteger la información.
3. Realizar pruebas del sistema SGR y asegurar su funcionamiento óptimo, verificando su fiabilidad en condiciones reales y garantizando que cumpla con los requisitos establecidos para el prototipo final.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Introducción

El control de descargas electrostáticas (ESD, por sus siglas en inglés) es un aspecto crucial en entornos industriales y de investigación donde se manejan componentes electrónicos y dispositivos altamente sensibles. Las descargas electrostáticas pueden ocasionar daños irreparables a equipos electrónicos, lo que genera pérdidas económicas, interrupciones en procesos de producción y posibles fallas en dispositivos de alta tecnología. Por lo tanto, las medidas preventivas, como el uso adecuado de calzado y equipo de protección, son fundamentales para minimizar estos riesgos.

El proyecto SGR (Staff Grounding Recorder) se presenta como una solución innovadora para la validación del calzado del personal que ingresa a áreas controladas de ESD. Su objetivo principal es garantizar que los colaboradores cumplan con las condiciones necesarias de puesta a tierra, asegurando que el personal no represente un riesgo de descarga electrostática al entrar a zonas críticas. A través de un sistema biométrico basado en huellas dactilares, el dispositivo validará de forma automática la resistencia del calzado del usuario, asegurando que el colaborador esté debidamente conectado a tierra antes de ingresar a un área donde la protección contra ESD es vital.

El dispositivo SGR no solo realizará esta validación de manera eficiente, sino que también registrará los resultados de cada prueba, almacenando datos de los colaboradores como el ID, nombre, número de empleado, medición de resistencia en Ohmios, y la fecha y hora exacta del registro. Este registro puede ser consultado a través de una interfaz web segura, lo que permite un monitoreo en tiempo real y la generación de auditorías. Además, cuenta con un sistema de indicadores visuales y una salida a relé para activar barreras electrónicas, como puertas o torniquetes, lo que refuerza la seguridad al garantizar que solo el personal debidamente validado pueda ingresar a áreas sensibles.

La relevancia del SGR radica en su capacidad para automatizar y sistematizar el proceso de validación, reduciendo significativamente los riesgos de ESD en sectores donde el manejo de componentes electrónicos es crítico. De este modo, se contribuye a mejorar la seguridad, la eficiencia operativa y la trazabilidad de las pruebas, cumpliendo con las normativas internacionales sobre control de ESD y protección de equipos electrónicos.

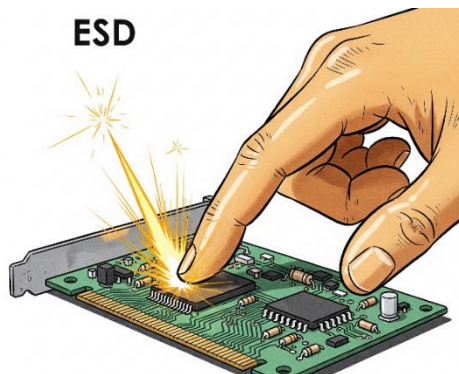
Descargas Electrostáticas (ESD)

2.2.1 Definición y Fundamentos Físicos del ESD

Las **descargas electrostáticas (ESD)** son fenómenos que ocurren cuando dos objetos con diferentes potenciales eléctricos entran en contacto, lo que provoca la transferencia de carga entre ellos. Este fenómeno se produce cuando un objeto cargado eléctricamente entra en contacto con otro que tiene una carga diferente o que se encuentra a un potencial distinto. La acumulación de cargas puede ser el resultado de la fricción entre materiales, el contacto con superficies conductoras o la inducción de cargas a través del aire, y se puede observar con frecuencia en ambientes industriales y comerciales.

Cuando un objeto cargado entra en contacto con un material conductor, la carga acumulada se transfiere rápidamente, generando una **descarga electrostática**. Este proceso puede ocurrir de dos maneras principales: **contacto directo** (cuando un objeto cargado toca otro de diferente carga) o **por proximidad** (cuando los objetos se acercan lo suficiente, permitiendo que la carga se "salte" por el aire a través de una chispa). La descarga resultante, aunque breve, puede ser muy intensa, alcanzando miles de voltios, lo que puede tener efectos adversos en componentes electrónicos sensibles.

Figura 1 Descarga Electroestica



StromLab. (2022). ¿Qué son las descargas electrostáticas (ESD) y por qué es necesario controlarlas? [Fotografía]. StromLab. <https://www.stromlab.com/blog/blog-de-stromlab-1/que-son-descargas-electrostaticas-esd-y-porque-es-necesario-controlarlas-3>

El fenómeno de ESD se basa en las **leyes de la electrostática**, específicamente en la **ley de Coulomb**, que describe la fuerza entre dos cargas puntuales. Esta ley establece que la magnitud de la fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional

al cuadrado de la distancia entre ellas. En un entorno controlado, la acumulación de estas cargas debe ser gestionada adecuadamente para evitar descargas no deseadas que puedan dañar dispositivos electrónicos.

2.2.2 Causas del ESD

Las **causas del ESD** en ambientes industriales son diversas y varían dependiendo de las actividades realizadas. Las principales fuentes de acumulación de cargas electrostáticas incluyen:

Fricción entre materiales: Este es uno de los principales factores que contribuye a la acumulación de cargas. Cuando dos materiales, especialmente los que tienen propiedades dieléctricas, se frotan entre sí (por ejemplo, ropa sintética, zapatos de goma, etc.), se genera una transferencia de electrones, acumulando cargas en ambos objetos. Esto ocurre en el contacto entre las suelas de los zapatos del personal y el suelo, o entre herramientas y materiales plásticos.

Movimiento de personas Modelo HBM: Los seres humanos son una fuente importante de ESD debido a la fricción que ocurre al caminar sobre superficies sintéticas, como alfombras o pisos de vinilo. El movimiento del cuerpo humano genera una carga estática que puede liberarse al entrar en contacto con otros objetos o equipos.

Figura 2 Modelo-cuerpo-humano-HBM



Sierra Alonso, S. (2009). Calzado y ropa de protección "antiestáticos" [Fotografía]. Sevilla. Recuperado de <https://www.insst.es/documents/94886/214929/EPI+para+ATEX.pdf/d32dad20-aba0-42e0-9da5-43eb5cb6cda6>

Maquinaria y equipos Modelo MM: Las máquinas, equipos y dispositivos en áreas de trabajo también son causantes de ESD. Los movimientos mecánicos, como el rodaje de ruedas de equipo o la operación de maquinaria pesada, pueden generar acumulaciones de cargas estáticas, especialmente en ambientes donde se manejan materiales no conductores o plásticos.

Manipulación de productos electrónicos: La manipulación de componentes electrónicos o dispositivos sensibles en un ambiente industrial puede generar ESD, ya que estos materiales son muy susceptibles a cargas eléctricas debido a su baja resistencia a la electricidad.

Condiciones ambientales: La **humedad relativa** juega un papel importante en la acumulación de cargas estáticas. En ambientes secos, las cargas no se disipan fácilmente, lo que aumenta la probabilidad de que se acumulen y generen descargas. En climas húmedos, la humedad actúa como un disipador de cargas, reduciendo el riesgo de ESD.

2.2.3 Efectos del ESD

Las **descargas electrostáticas** son peligrosas para los dispositivos electrónicos, ya que pueden causar **daños inmediatos o degradación a largo plazo**. A continuación, se describen algunos de los efectos más relevantes:

Daño directo a componentes electrónicos: Las descargas electrostáticas pueden dañar de forma irreversible los circuitos electrónicos de componentes como **microchips, transistores, y circuitos integrados**. Este daño puede ser **inmediato**, haciendo que el dispositivo falle al instante, o puede causar **degradación silenciosa**, lo que reduce la vida útil de los componentes, provocando fallas funcionales que podrían no manifestarse hasta más adelante. Por ejemplo, una descarga puede alterar la capacidad de los semiconductores, afectando su desempeño.

Figura 3 Daño al componente por ESD



item24. (2021). Determinación de daños por ESD utilizando un microscopio electrónico [Fotografía]. <https://blog.item24.com/es/esd-es/determinacion-de-danos-por-esd-utilizando-un-microscopio-electronico/>

Fallas funcionales e interrupciones en procesos: En industrias como la de **semiconductores**, **telecomunicaciones** y **equipos médicos**, las descargas electrostáticas pueden provocar fallos en los procesos de fabricación o la pérdida de datos críticos. En entornos donde los equipos deben funcionar con una precisión extrema, incluso una pequeña descarga puede tener efectos desastrosos, interrumpiendo la producción o los servicios, lo que podría generar pérdidas económicas y afectar la confiabilidad del sistema.

Pérdidas económicas: En sectores de alta tecnología como la fabricación de **chips electrónicos** o **dispositivos médicos**, el daño causado por ESD puede resultar en costosos retrasos en la producción, reparaciones y reemplazos de equipos. Además, la pérdida de **datos** debido a fallas causadas por ESD puede ser irreparable, afectando no solo el rendimiento de los equipos sino también la confianza en los productos fabricados.

Riesgos en el ámbito médico: Los **equipos médicos** como **marcapasos** o **monitores de pacientes** son altamente sensibles a las descargas electrostáticas. Un ESD puede alterar la operación de estos dispositivos, lo que pone en peligro la vida de los pacientes y compromete la integridad de los sistemas de atención.

Normativas y Estándares de ESD: ANSI/ESD S20.20

2.3.1 Importancia de los Estándares ESD

Las **normativas y estándares de ESD** son fundamentales para garantizar que las industrias que manejan componentes electrónicos delicados adopten prácticas seguras y efectivas para prevenir los efectos adversos de las descargas electrostáticas. Estas normativas proporcionan un marco de trabajo para implementar controles y procedimientos que aseguren la protección de equipos sensibles a ESD, como semiconductores, dispositivos médicos, sistemas de telecomunicaciones, y productos de alta tecnología.

Una de las normativas más reconocidas y ampliamente adoptadas a nivel mundial es la **ANSI/ESD S20.20**, un estándar desarrollado por la **Asociación Nacional de Normas Americanas (ANSI)** en colaboración con el **Electrostatic Discharge Association (ESDA)**. Este estándar establece directrices y requisitos para la **implementación de programas de control de ESD** dentro de las organizaciones, con el fin de minimizar el riesgo de daños a los componentes electrónicos durante su fabricación, manipulación y transporte.

Figura 4 ESD ASSOCIATION



Electrostatic Discharge Association (ESDA). (s.f.). Logo de la ESDA [Logo]. [https:// www.esda.org/](https://www.esda.org/)

2.3.2 Pautas para la Implementación de Programas de Control de ESD según ANSI/ESD S20.20

El estándar **ANSI/ESD S20.20** proporciona un enfoque estructurado para la creación e implementación de un programa de control de ESD, cubriendo áreas clave como la capacitación del personal, el control de los ambientes de trabajo y la validación de equipos. Las principales pautas que ofrece este estándar incluyen:

- **Política y Responsabilidad del Control de ESD**

La primera directriz de la norma establece que **todas las organizaciones deben tener una política clara** sobre el control de ESD, que debe ser aprobada por la alta dirección. Esta política debe incluir los objetivos de protección contra ESD, la asignación de responsabilidades dentro de la organización y el compromiso con la mejora continua.

La **responsabilidad del control de ESD** debe ser asignada a un **coordinador de ESD**, quien será el encargado de supervisar la implementación y el cumplimiento de los procedimientos establecidos.

- **Evaluación de Riesgos y Control de Áreas Críticas**

El estándar establece que las **áreas de trabajo críticas** deben ser identificadas y **evaluadas para riesgos de ESD**. Esto incluye áreas de ensamblaje, pruebas, y cualquier otra zona donde se manipulen componentes electrónicos sensibles. En estas áreas, se deben tomar medidas preventivas para garantizar que no se acumulen cargas peligrosas.

Se debe realizar una **evaluación periódica del riesgo de ESD** en las instalaciones, lo que incluye la identificación de fuentes potenciales de ESD, como maquinaria, mobiliario, y superficies.

- **Control de Superficies y Equipos de Trabajo**

El control de **superficies conductoras** es esencial. Las superficies de trabajo deben estar **conectadas a tierra** para permitir la disipación controlada de cargas electrostáticas. Los materiales utilizados en estas superficies deben cumplir con los requisitos de conductividad especificados por el estándar.

Las **alfombrillas de trabajo**, mesas y estanterías deben ser **conductivas o disipativas**, y deben estar conectadas adecuadamente a tierra para evitar la acumulación de cargas.

- **Uso de Equipos de Protección Personal (EPP)**

Los empleados deben ser **equipados con dispositivos de protección personal (EPP)** como **calzado antidescargas**, **brazales antiestáticos**, y **vestimenta especializada** para prevenir la acumulación de cargas electrostáticas en su cuerpo. Los dispositivos de **puesta a tierra personal** son obligatorios para garantizar que cualquier carga estática acumulada sea disipado de manera segura.

Los **zapatos antidescargas** son un componente esencial en las políticas de ESD, y el estándar destaca la necesidad de realizar pruebas regulares para asegurarse de que el calzado esté en condiciones óptimas para su funcionamiento.

- **Capacitación del Personal**

El **personal debe ser entrenado regularmente** sobre las mejores prácticas para prevenir ESD. Esto incluye la comprensión de los principios fundamentales de las descargas electrostáticas, el manejo adecuado de los componentes electrónicos y la correcta utilización del equipo de protección.

La capacitación debe abarcar tanto a los **operadores** como a los **supervisores** y cualquier otra persona involucrada en la manipulación de dispositivos sensibles a ESD.

- **Monitoreo y Auditoría Continua**

El estándar ANSI/ESD S20.20 establece la necesidad de implementar un **programa de monitoreo** para asegurarse de que todas las prácticas y controles estén funcionando correctamente. Esto incluye la **medición continua de la resistencia de los equipos de**

protección (como los zapatos y brazaletes), y la verificación regular de las **superficies de trabajo**.

Se deben realizar **auditorías periódicas** para verificar que todos los procedimientos se estén siguiendo correctamente, y que los equipos y el personal estén alineados con las normativas de control de ESD.

- **Documentación y Registros**

Es esencial mantener una **documentación detallada** de todos los procesos relacionados con el control de ESD, como los informes de pruebas, la capacitación del personal, las auditorías realizadas y las inspecciones de equipos. El registro adecuado de estos datos asegura la trazabilidad y permite realizar mejoras en los procedimientos cuando sea necesario.

2.3.3 Relevancia del Estándar ANSI/ESD S20.20

El cumplimiento del **estándar ANSI/ESD S20.20** es crucial para aquellas empresas que manejan componentes electrónicos sensibles, ya que asegura que se adopten prácticas preventivas para proteger los productos y equipos de las descargas electrostáticas. A través de un **control riguroso y documentado**, las organizaciones pueden minimizar los riesgos asociados a ESD, reduciendo la tasa de fallas de los dispositivos y mejorando la fiabilidad de sus procesos de fabricación.

Este estándar es particularmente importante en industrias como la de **semiconductores, equipos médicos, telecomunicaciones, y automotriz**, donde la calidad y precisión de los componentes electrónicos es crítica. Además, el cumplimiento de **normas internacionales** como la **ANSI/ESD S20.20** también puede ser un **requisito contractual** para proveedores y clientes en mercados globales.

Validación de Calzado en Áreas ESD

2.4.1 Importancia de la Puesta a Tierra del Personal

La **puesta a tierra del personal** es un aspecto esencial para la protección contra descargas electrostáticas (ESD) en áreas de trabajo sensibles. El calzado juega un papel fundamental en este proceso, ya que es el conductor que permite que cualquier carga estática acumulada en el cuerpo del colaborador se disipe de manera segura hacia el suelo, evitando que dicha carga se libere en forma de una descarga peligrosa hacia equipos electrónicos o componentes sensibles.

El calzado diseñado para proteger contra ESD está fabricado con materiales **conductivos** o **disipativos** que permiten que la **resistencia eléctrica** entre el usuario y el suelo esté dentro de un rango seguro. Si el calzado no cumple con las condiciones necesarias de resistencia, puede ser una fuente de peligro, ya que puede impedir la **disipación controlada de cargas electrostáticas**, aumentando el riesgo de que se generen descargas inesperadas al entrar en contacto con objetos o equipos sensibles.

Por esta razón, la **validación del calzado** antes de que el personal ingrese a áreas controladas de ESD es crucial. Un sistema de validación asegura que el calzado esté en condiciones óptimas para cumplir su función de disipar cargas electrostáticas de forma segura, protegiendo tanto a los empleados como a los equipos tecnológicos. La medición de la resistencia del calzado se convierte en un procedimiento esencial, ya que

“ Creación del SGR (Staff Grounding Recorder)”

garantiza que el personal se encuentre **conectado a tierra de manera adecuada**, evitando el riesgo de descargas accidentales y asegurando la integridad de los dispositivos electrónicos.

Además, este proceso de validación es necesario para cumplir con las normativas de control de ESD, como el **ANSI/ESD S20.20**, que requieren que las empresas implementen procedimientos sistemáticos para verificar la **resistencia eléctrica** del calzado del personal antes de su ingreso a áreas críticas.

2.4.2 Métodos de Medición de la Puesta a Tierra del Calzado

Existen varios métodos y tecnologías para medir la **resistencia eléctrica del calzado**, los cuales se utilizan para evaluar la eficacia de la puesta a tierra en los trabajadores que ingresan a áreas controladas de ESD. Los métodos más comunes incluyen:

Para garantizar una adecuada disipación de cargas electrostáticas en áreas protegidas contra ESD (Electrostatic Discharge), es fundamental verificar que el calzado del personal cumpla con los niveles de resistencia establecidos por las normativas internacionales. A continuación, se describen los métodos más comúnmente utilizados en el mercado para realizar esta medición:

- **Medición de la Resistencia en Ohmios:** Es el método más utilizado y estandarizado para evaluar si el calzado permite una correcta disipación de la electricidad estática. Se mide la resistencia eléctrica entre la suela del calzado y una superficie conductora conectada a tierra, utilizando equipos como testers de calzado ESD (footwear testers) o estaciones combinadas de prueba (calzado y muñequeras). La medición generalmente se realiza en un punto de acceso antes de ingresar a áreas ESD, donde el trabajador se coloca sobre una placa metálica y toca una sonda o electrodo del equipo. Si la resistencia se encuentra dentro del rango permitido — típicamente entre 1×10^6 y 1×10^9 ohmios, según la norma ANSI/ESD STM97.1—, el sistema autoriza el ingreso.
- **Sistemas de Validación con Control de Acceso:** En muchas instalaciones, los testers ESD están integrados con sistemas de control de acceso mediante tarjetas RFID o códigos de barras. Esto permite registrar los resultados de la medición y vincularlos a cada trabajador, garantizando trazabilidad y cumplimiento de las políticas de protección ESD. Aunque existen soluciones más avanzadas, como reconocimiento facial o integración biométrica, estas **no son comunes ni ampliamente implementadas** en la validación de calzado ESD.
- **Equipos Portátiles de Medición:** Para verificaciones puntuales o inspecciones de campo, también se utilizan medidores portátiles de resistencia eléctrica. Estos permiten comprobar rápidamente si un calzado cumple con los estándares sin necesidad de una estación fija, aunque su uso suele estar limitado a tareas de mantenimiento o auditorías internas.

2.4.3 Importancia de la Medición Adecuada

Una medición precisa de la resistencia del calzado es esencial para asegurar que los colaboradores estén adecuadamente conectados a tierra. Si la resistencia es demasiado alta, el calzado no disipará correctamente las cargas electrostáticas, lo que incrementa el riesgo de descargas accidentales hacia equipos sensibles o productos. Por otro lado, si la resistencia es demasiado baja —por debajo de 1×10^6 ohmios, según lo establecido por normas como ANSI/ESD STM97.1—, la descarga de electricidad estática podría ocurrir de forma demasiado rápida, generando picos de corriente que podrían dañar componentes electrónicos sensibles. Además, una resistencia muy baja puede comprometer el aislamiento del cuerpo humano frente a otros riesgos eléctricos, especialmente en entornos donde hay equipos energizados.

La validación continua y precisa del calzado es una parte integral de un programa eficaz de control de ESD, contribuyendo a mantener la integridad de los componentes electrónicos y la seguridad de los trabajadores en ambientes controlados.

Figura 5 Medición a Tierra



Euroasica. (s.f.). Comprobador de calzado y muñequera [Producto]. <https://euroasica.com/ficha-producto/comprobador-de-calzado-munequera/>

Antecedentes de Medidores de Puesta a Tierra

Desde hace décadas, los medidores de puesta a tierra han sido herramientas esenciales para evaluar y garantizar la seguridad en entornos industriales donde se manejan equipos electrónicos sensibles. Estos dispositivos convencionales han evolucionado significativamente en términos de precisión y funcionalidad, pasando de modelos analógicos a sistemas digitales más sofisticados. Los medidores tradicionales requerían intervención manual constante y podían ser propensos a errores humanos, lo que limitaba su eficacia en la detección temprana de problemas de puesta a tierra.

Con el avance de la tecnología, especialmente en el campo de los microcontroladores y sensores avanzados, se ha facilitado la automatización de las mediciones de puesta a tierra. Los sistemas modernos como el SGR (Staff Grounding Recorder) utilizan microcontroladores como el ESP32, que integran capacidades de medición precisa y comunicación inalámbrica, permitiendo monitorear y registrar continuamente la resistencia de puesta a tierra en tiempo real. Esto no solo mejora la precisión de las mediciones, sino que también proporciona datos históricos valiosos para análisis y optimización futura de los sistemas de protección contra ESD.

Figura 6 Medidor Convencional



ITM. (s.f.). SCS 740 Wrist Strap and Footwear Tester [Producto]. <https://www.itm.com/product/scs-740-wrist-strap-and-footwear-tester>

La transición hacia sistemas digitales y automatizados como el SGR ha sido motivada por la necesidad de mejorar la eficiencia operativa y la seguridad en entornos industriales. Estos sistemas no solo optimizan el tiempo dedicado a la supervisión manual de la puesta a tierra, sino que también reducen los costos asociados a mantenimientos correctivos por fallos causados por ESD. Además, permiten una gestión proactiva al anticipar posibles problemas de puesta a tierra antes de que afecten la operación normal de los equipos electrónicos.

Tecnologías y Componentes Utilizados en el SGR

El dispositivo **SGR (Staff Grounding Recorder)** estará compuesto por diversos módulos tecnológicos que permiten la correcta validación del calzado del personal en áreas controladas de ESD, así como el almacenamiento y gestión eficiente de los datos generados. A continuación, se describen los principales componentes tecnológicos que forman la base del SGR, proporcionando una visión técnica de cómo cada uno contribuye al funcionamiento del sistema.

2.6.1 Historia de los Microcontroladores

Primera Generación Los primeros microcontroladores surgieron en la década de 1970, como el Intel 8048 y el Motorola 6800. Estos dispositivos combinaban CPU, memoria y periféricos en un solo chip, lo que los hacía ideales para aplicaciones simples como electrodomésticos y control industrial básico.

Figura 7 Intel 4004



Fandom. (s.f.). Intel 4004 [Página de Wikipedia]. https://computer.fandom.com/wiki/Intel_4004

Avances en la Década de 1980: En la década de 1980, la tecnología de microcontroladores avanzó con la introducción de chips más potentes y la incorporación de memoria flash reprogramable. Microcontroladores como el Intel 8051 y el Motorola 68HC11 se convirtieron en estándares en la industria, ampliando su uso en aplicaciones más sofisticadas como automóviles y sistemas de comunicación.

Figura 8 Motorola 68HC11



Wikipedia contributors. (s.f.). Motorola 68HC11 microcontroller [Imagen]. En Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Motorola_68HC11

Década de 1990 y 2000: Durante este periodo, los microcontroladores continuaron mejorando en términos de velocidad de procesamiento, capacidad de memoria, y la integración de periféricos especializados como convertidores analógico-digitales (ADC), interfaces de comunicación serial, y módulos de temporización. Microcontroladores como el PIC de Microchip, AVR de Atmel y MSP430 de Texas Instruments ganaron popularidad debido a su eficiencia energética y facilidad de uso en aplicaciones de bajo consumo.

Figura 9 MSP430



Mouser Electronics. (s.f.). MSP430 Low Voltage MCUs [Imagen]. <https://www.mouser.mx/new/texas-instruments/ti-msp430-low-voltage-mcus/>

2.6.2 Microcontrolador ESP32 y su utilización en Sistemas Embebidos

El ESP32 es un microcontrolador avanzado ampliamente utilizado en aplicaciones IoT y sistemas embebidos. Su versatilidad y capacidad para manejar múltiples tareas simultáneamente lo hacen ideal para aplicaciones industriales donde se requiere comunicación inalámbrica, procesamiento de datos en tiempo real y control preciso de sensores. En el proyecto SGR, el ESP32 se utiliza para capturar datos de resistencia de puesta a tierra mediante su ADC integrado, asegurando mediciones precisas y continuas que son fundamentales para monitorear la integridad de la puesta a tierra en entornos críticos.

La programación del ESP32 se realiza utilizando lenguajes de programación como Arduino IDE, que ofrece una plataforma de desarrollo accesible y potente para crear firmware personalizado que satisfaga las necesidades específicas del SGR. La integración del ESP32 no solo simplifica la captura de datos de puesta a tierra, sino que también facilita la comunicación con otros dispositivos dentro de la red de monitoreo, proporcionando una visión holística del estado de la puesta a tierra en toda la instalación industrial.

Figura 10 ESP32 de última generación



Eckstein Shop. (s.f.). ESP32 IoT Wifi, Wlan, Bluetooth Module [Imagen]. <https://eckstein-shop.de/EspressifESP-WROOM-32originalESP32IoTWifiWlanBluetoothModuleDualCore240MHz>

2.6.2.1 ESP32 WROOM 32

El **ESP32 WROOM 32** es el microcontrolador central del SGR, y su rol es fundamental en la operación del dispositivo. Este componente es responsable de gestionar todas las funciones de procesamiento y comunicación del sistema, lo que incluye la **validación del calzado**, la **autenticación biométrica** y la **conexión a Internet** para la consulta de datos.

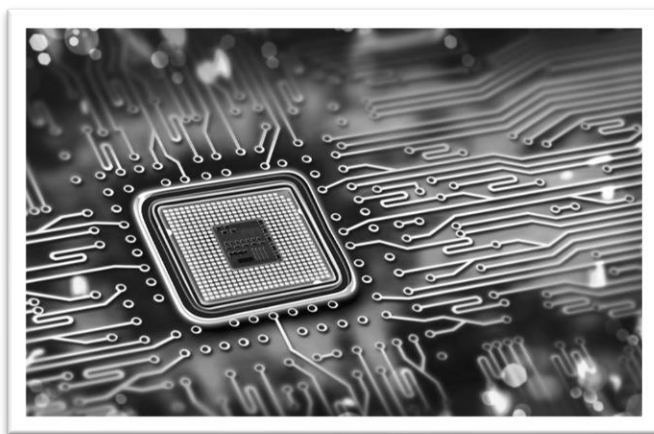
Características clave:

- **Conectividad Wi-Fi:** El ESP32 posee capacidad de conectividad **Wi-Fi** integrada, lo que permite la transmisión de datos en tiempo real.
- **Potente procesamiento:** El ESP32 es un microcontrolador **dual-core**, lo que permite la ejecución simultánea de varias tareas, como el manejo de la validación biométrica mediante huella digital, el control del sistema de medición de resistencia, y la actualización en tiempo real de la interfaz de usuario.
- **Bajo consumo energético:** Este microcontrolador está diseñado para ser eficiente en términos de energía, lo que es crucial para el funcionamiento continuo del dispositivo sin necesidad de intervenciones frecuentes.

2.6.3 Programación de Dispositivos y Desarrollo de Firmware

La programación adecuada del ESP32 es crucial para el funcionamiento eficiente del SGR. La configuración del ADC para la medición de resistencia de puesta a tierra se realiza de manera óptima para garantizar mediciones precisas y confiables en todo momento. El desarrollo de firmware incluye la implementación de algoritmos de procesamiento de señales que filtran el ruido y mejoran la precisión de las mediciones, asegurando que los datos capturados reflejen de manera precisa el estado real de la puesta a tierra en el entorno industrial.

Figura 11 Chip con Firmware



Innovaspain. Imagen sobre la nanotecnología española en Francia [Imagen]. s.f. Innovaspain. <https://www.innovaspain.com/la-nanotecnologia-espanola-tambien-pasa-francia-viceversa/>

El firmware del SGR también gestiona la comunicación con la base de datos donde se almacenan los registros históricos de mediciones, asegurando una gestión eficiente de datos que permite el análisis posterior y la generación de informes sobre la integridad de la puesta a tierra. La programación del ESP32 se realiza siguiendo prácticas de desarrollo de software robustas que garantizan la estabilidad y la seguridad del sistema SGR en operaciones continuas y exigentes.

2.6.4 Lector de Huellas Dactilares (UART)

El **lector de huellas dactilares (UART)** es un componente biométrico que proporciona una capa adicional de **seguridad y personalización** al proceso de validación. Este lector permite autenticar al colaborador mediante su huella digital antes de realizar la medición de la resistencia del calzado.

2.6.4.1 Tecnología de Lectores Biométricos y Su Aplicación

Los lectores biométricos, como el sensor AS608, desempeñan un papel crucial en la autenticación segura de usuarios en el SGR. Estos dispositivos utilizan características físicas únicas de los individuos, como huellas dactilares, para verificar la identidad con alta precisión y confiabilidad. Integrados con microcontroladores como el ESP32, los lectores biométricos permiten un acceso seguro y controlado al sistema SGR, asegurando que solo personal autorizado pueda realizar mediciones de puesta a tierra y acceder a registros históricos.

Figura 12 AS608



UElectronics. (s.f.). Lector sensor huella dactilar digital AS608 [Imagen]. <https://uelectronics.com/producto/lector-sensor-huella-dactilar-digital-as608/>

La tecnología de lectores biométricos ha avanzado significativamente en términos de precisión y velocidad, facilitando su integración en aplicaciones industriales donde la seguridad y la trazabilidad son críticas. En el contexto del SGR, la utilización de lectores biométricos no solo mejora la seguridad del acceso al sistema, sino que también asegura que los registros de mediciones de puesta a tierra sean precisos y confiables, cumpliendo con estándares de calidad y seguridad exigentes como la normativa ANSI ESD 2020.

Bases de Datos y Uso de SQLite

2.7.1 Concepto de Base de Datos

Una **base de datos** es un sistema organizado para recopilar, almacenar y gestionar grandes cantidades de información. Las bases de datos permiten almacenar datos de manera estructurada, lo que facilita su acceso, manipulación y actualización de forma eficiente. Estos sistemas son fundamentales en aplicaciones donde se necesita una gran cantidad de datos, acceso rápido y la posibilidad de realizar diversas consultas.

Las bases de datos se gestionan mediante un **Sistema de Gestión de Bases de Datos (DBMS, por sus siglas en inglés)**, que se encarga de proporcionar un conjunto de herramientas y lenguajes de programación para interactuar con los datos. El **SQL (Structured Query Language)** es el lenguaje estándar utilizado para realizar consultas y manipular bases de datos.

Figura 13 Base de Datos SQL



LearnSQL, (s.f.). Las bases de datos más populares en 2023 [Imagen]. En LearnSQL. <https://learnsql.es/blog/las-bases-de-datos-mas-populares-en-2023/>

2.7.2 Tipos de Bases de Datos

Existen diferentes tipos de bases de datos dependiendo de su estructura y de cómo están diseñadas para interactuar con los datos. Los dos tipos principales son:

- **Bases de Datos Relacionales:** Estas bases de datos organizan los datos en **tablas** de filas y columnas, con relaciones entre ellas. Utilizan el lenguaje **SQL** para gestionar y manipular los datos.
- **Bases de Datos No Relacionales:** Almacenan datos de manera no estructurada, y aunque son muy eficaces en ciertos tipos de aplicaciones (por ejemplo, bases de datos de tipo **documento**, **clave-valor** o **columna**), no emplean el modelo de tablas tradicional.

Figura 14 Logo SQL



SoyunDBA. (s.f.). Los objetos de SQL [Imagen]. En SoyunDBA. <https://soyundba.com/leccion/los-objetos-de-sql/>

2.7.3 SQLite: Definición y Características

SQLite es una base de datos relacional ligera, embebida y de alto rendimiento. A diferencia de otros sistemas de gestión de bases de datos como **MySQL** o **PostgreSQL**, **SQLite** no requiere de un servidor externo para funcionar, lo que la hace ideal para aplicaciones que necesitan almacenar datos localmente sin la sobrecarga de un servidor de bases de datos completo.

- Las principales características de **SQLite** son:
- **Base de Datos Embebida:** SQLite es una biblioteca que se integra directamente en la aplicación, sin necesidad de instalar o configurar un servidor de base de datos. El motor de base de datos se ejecuta dentro de la misma aplicación, y todos los datos se almacenan en un único archivo en el sistema de archivos.

- **Ligereza y Simplicidad:** SQLite está diseñado para ser muy ligero, lo que lo hace adecuado para aplicaciones con recursos limitados, como dispositivos embebidos, aplicaciones móviles o proyectos pequeños que no requieren una infraestructura compleja de bases de datos.
- **Formato de Almacenamiento:** Los datos en SQLite se almacenan en un solo archivo con un formato compacto y eficiente. Este archivo puede ser fácilmente respaldado o trasladado, lo que facilita la gestión y transferencia de datos.
- **Uso de SQL:** Al ser una base de datos relacional, SQLite utiliza **SQL** para consultar y manipular los datos. Las operaciones como insertar, actualizar, eliminar o consultar registros se hacen mediante comandos SQL estándar.
- **Sin Servidor:** No requiere un proceso de servidor dedicado; en cambio, el software de la aplicación interactúa directamente con el archivo de la base de datos, lo que simplifica la arquitectura del sistema y reduce la complejidad operativa.
- **Soporte para Transacciones:** SQLite admite transacciones, lo que permite que las operaciones sobre la base de datos se agrupen y se realicen de manera atómica (es decir, o todas se completan con éxito o ninguna se aplica).

2.7.4 Ventajas de Utilizar SQLite

- **Simplicidad y Facilidad de Implementación:** SQLite es fácil de integrar en aplicaciones de todo tipo. Su configuración es mínima, y no requiere un servidor de bases de datos independiente ni complejas configuraciones de red.
- **Rendimiento:** Es altamente eficiente en la manipulación de bases de datos pequeñas a medianas. Dado que no depende de un servidor, las operaciones son rápidas y se realizan en el contexto local de la aplicación.
- **Portabilidad:** Dado que SQLite almacena todos los datos en un solo archivo, el sistema de base de datos es altamente portátil. Este archivo puede ser movido entre diferentes sistemas operativos sin mayores problemas.
- **Bajo Consumo de Recursos:** SQLite es muy ligero y tiene un bajo impacto en el rendimiento del sistema, lo que lo convierte en una excelente opción para dispositivos con recursos limitados, como sistemas embebidos, dispositivos móviles o proyectos IoT.

2.7.5 Uso de SQLite en Aplicaciones Embebidas y Sistemas Locales

SQLite se utiliza comúnmente en una variedad de aplicaciones, especialmente cuando se requieren bases de datos ligeras, autónomas y fáciles de gestionar. Algunos de los usos más frecuentes incluyen:

- **Aplicaciones móviles:** Muchos sistemas operativos móviles, como **Android** e **iOS**, utilizan SQLite para almacenar datos localmente, debido a su bajo consumo de recursos y su facilidad de uso.
- **Dispositivos embebidos:** En sistemas embebidos o dispositivos con limitaciones de memoria y procesamiento, SQLite se emplea para almacenar datos localmente sin la necesidad de un servidor de base de datos.
- **Aplicaciones de escritorio:** En aplicaciones de escritorio que no requieren una infraestructura de base de datos externa, SQLite puede ser una opción ideal para gestionar configuraciones de usuarios, preferencias o almacenamiento de información.

Figura 15 Conexion SQL



Salud Electrónica. (s.f.). SQL vs NoSQL [Imagen]. En Salud Electrónica. <https://saludelectronica.com/base-de-datos-sql-vs-no-sql/>

Aplicaciones y Beneficios de un Sistema de Medición y Control ESD

El control de las descargas electrostáticas (ESD) es esencial en entornos donde se manipulan componentes electrónicos sensibles, ya que incluso niveles bajos de electricidad estática pueden causar daños irreversibles en dispositivos, fallas intermitentes o pérdida de datos. Por este motivo, las normativas internacionales como la **ANSI/ESD S20.20** exigen la implementación de medidas de protección en áreas controladas, incluyendo la validación periódica de los elementos de protección personal, como el calzado disipativo.

Una de las prácticas más efectivas es la **medición de la resistencia eléctrica del sistema persona–calzado–suelo**, con el fin de asegurar que se encuentra dentro del rango seguro establecido (entre 1×10^6 y 1×10^9 **ohmios**, según la norma ANSI/ESD STM97.1). Este control permite verificar que el trabajador esté adecuadamente conectado a tierra y en condiciones de disipar cargas electrostáticas de forma segura.

Aplicaciones típicas de estos sistemas de validación se encuentran en industrias de alta sensibilidad, tales como:

- **Fabricación de componentes electrónicos y semiconductores**
- **Laboratorios de investigación y desarrollo**
- **Industria aeroespacial**
- **Producción farmacéutica**
- **Ambientes con dispositivos médicos o sistemas de precisión**

En estos entornos, los sistemas de medición ESD pueden ser integrados en los accesos a zonas críticas, permitiendo una validación rápida del personal antes de ingresar. Además, la **automatización del proceso de medición** y el **registro digital de resultados** ofrecen ventajas importantes frente a los métodos manuales tradicionales.

Entre los **beneficios clave** de estos sistemas destacan:

- ☒ Mejora en la **seguridad del proceso productivo**, al asegurar condiciones adecuadas de descarga.
- ☒ Mayor **eficiencia operativa**, al automatizar el control y reducir tiempos de verificación.
- ☒ **Trazabilidad y registro histórico** de cumplimiento, útil para auditorías internas y externas.

“ Creación del SGR (Staff Grounding Recorder)”

- ☒ Integración con sistemas de **control de acceso**, impidiendo el ingreso de personal no conforme.
- ☒ Reducción de **errores humanos**, al eliminar la necesidad de comprobaciones manuales.

En resumen, los sistemas de medición y control ESD son herramientas fundamentales para minimizar riesgos en ambientes industriales críticos, garantizar la conformidad normativa y proteger activos electrónicos de alto valor.

Conclusión del Marco Teórico

El marco teórico presentado establece los fundamentos clave sobre el fenómeno de las descargas electrostáticas (ESD), las normativas que regulan su control y la importancia de las medidas preventivas en entornos industriales sensibles. El **SGR (Staff Grounding Recorder)** se perfilará como una herramienta tecnológica avanzada, diseñada para abordar los desafíos del control de ESD en áreas críticas. A través de la validación automática de la puesta a tierra del personal y el uso de tecnologías como la biometría, el SGR no solo garantiza la seguridad de los equipos electrónicos sensibles, sino que también optimiza la eficiencia operativa y el cumplimiento de las normativas internacionales.

La integración de componentes como el **microcontrolador ESP32**, el **RTC**, el **almacenamiento en tarjetas SD**, y la conectividad Wi-Fi para la consulta remota, refuerzan la capacidad del dispositivo para monitorear y gestionar el acceso en tiempo real, mejorando la trazabilidad y la seguridad. La capacidad de almacenar datos y permitir su consulta a través de una interfaz web, junto con la automatización del proceso de validación, también contribuye a la **reducción de riesgos** asociados a las ESD, asegurando un ambiente de trabajo seguro y eficiente.

En definitiva, el SGR es una **solución innovadora** que no solo se adapta a las necesidades de sectores industriales específicos, sino que también representa un avance importante en la implementación de **tecnologías de control de ESD**, apoyando la protección de equipos electrónicos sensibles y optimizando la gestión de la seguridad en el trabajo.

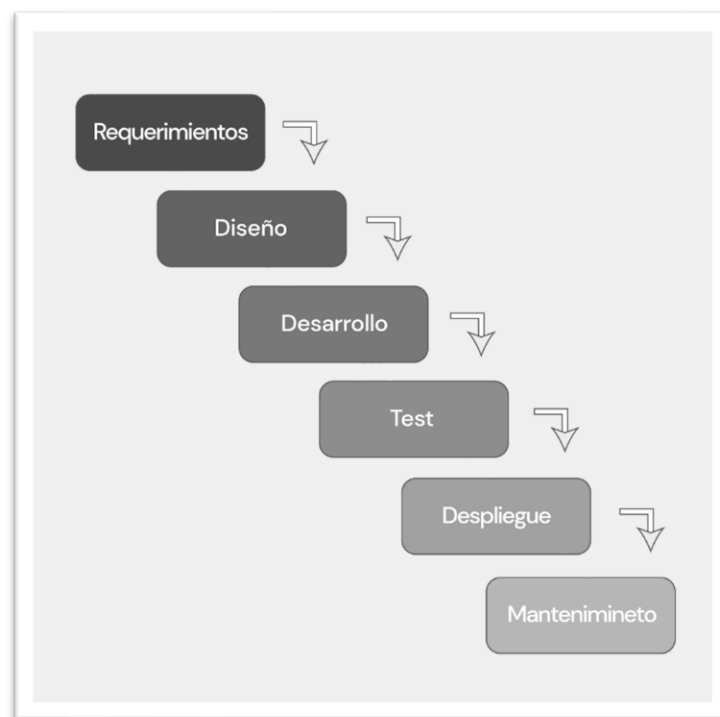
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

Marco Metodológico: Enfoque Híbrido de Waterfall, Agile y Prototipado Rápido

3.1.1 Introducción al Marco Metodológico

Este proyecto adopta un enfoque metodológico híbrido que integra las metodologías **Waterfall**, **Agile** y **Prototipado Rápido** para desarrollar un sistema eficiente y adaptable. Este enfoque permite combinar la planificación estructurada de **Waterfall** con la flexibilidad y adaptación de **Agile**, mientras se utiliza el **Prototipado Rápido** para validar conceptos de manera temprana.

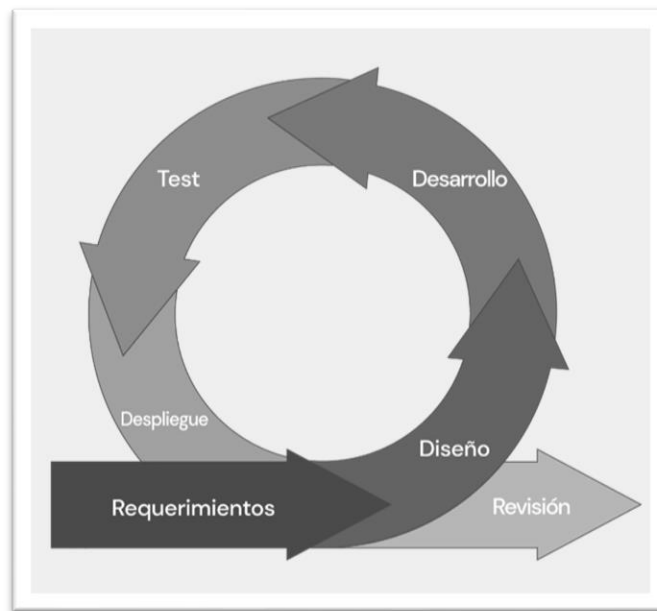
Figura 16 Metodología Waterfall



Donetonic. (s.f.). Metodología Waterfall vs Metodología Agile .En Donetonic. [https:// donetonic.com/ es/ metodologia-waterfall-vs-metodologia-agile/](https://donetonic.com/es/metodologia-waterfall-vs-metodologia-agile/)

En las fases iniciales, el **Prototipado Rápido** facilitará la creación de prototipos funcionales rápidos para validar ideas clave, realizar pruebas iniciales y obtener retroalimentación temprana. Posteriormente, el enfoque **Agile** permitirá un desarrollo iterativo, permitiendo ajustes continuos basados en las pruebas y retroalimentación. Finalmente, en las fases de integración y despliegue, se aplicará un enfoque más estructurado de **Waterfall** para garantizar la integración total del sistema y cumplir con los requisitos normativos y de calidad.

Figura 17 Metodología Agile



Donetonic. (s.f.). Metodología Waterfall vs Metodología Agile . En Donetonic. [https:// donetonic.com/es/ metodologia-waterfall-vs-metodologia-agile/](https://donetonic.com/es/metodologia-waterfall-vs-metodologia-agile/)

Fase 1: Investigación y Definición de Requisitos (Waterfall)

Objetivo:

Identificar las necesidades del sistema, definir los requisitos técnicos y normativos, particularmente los establecidos por las normas ANSI ESD 2020, y establecer un diseño conceptual del sistema a través de diagramas y prototipos.

Actividades:

Revisión de Literatura y Análisis de Tecnologías:

Estudio de tecnologías de medición de puesta a tierra y seguridad ESD.

Análisis de sensores biométricos como el AS608 y la integración de sistemas como el ESP32 para medición de resistencia.

Identificación y Definición de Requisitos Técnicos:

Definición de requisitos para componentes electrónicos, tales como pantallas LCD, módulos RTC, y protocolos de comunicación como UART, SPI e I2C.

Análisis de normativas y estándares, en especial las relacionadas con ANSI ESD 2020.

Elaboración de Diagramas de Modelado:

Diagramas de Casos de Uso: Se definirán los casos de uso que describen las interacciones entre los usuarios y el sistema, cubriendo todas las funcionalidades clave del sistema ESD.

Diagramas de Clases: Se modelarán las clases del sistema, mostrando sus atributos y métodos, así como las relaciones entre ellas.

Diagramas de Entidad-Relación (ER): Se crearán diagramas ER que representen las entidades del sistema y sus relaciones, permitiendo una visión clara de la base de datos necesaria para almacenar los resultados de medición y configuración del sistema.

Prototipado de Interfaz de Usuario:

Se desarrollará un prototipo de interfaz de usuario utilizando **Pencil Project**, una herramienta de prototipado de interfaces gráficas. Esto incluirá la creación de pantallas HTML representativas, como las vistas principales del sistema, formularios de configuración y visualización de mediciones.

Método:

Se emplea un enfoque estructurado de Waterfall, con la intención de asegurar que todos los requisitos sean detalladamente definidos y documentados antes de avanzar a la siguiente fase del desarrollo. Los diagramas y prototipos generados en esta fase servirán como base para la planificación y desarrollo de las siguientes fases del proyecto.

Fase 2: Prototipado Rápido Inicial (Prototipado Rápido + Agile)

Objetivo:

Desarrollar un prototipo funcional básico que permita validar las ideas clave del sistema, como la medición de resistencia, el uso de tecnologías biométricas para la autenticación y la interacción del sistema con diferentes módulos electrónicos.

Actividades:

1. Diseño Rápido del Prototipo:

- Se diseñará el prototipo utilizando herramientas como **Arduino IDE** para programar el microcontrolador **ESP32** y gestionar la comunicación con el sensor biométrico **AS608**.
- **Conexión de Módulos:** Se establecerán las conexiones entre el **ESP32** y los diferentes módulos del sistema, tales como el sensor biométrico **AS608**, el módulo **RTC DS1307**, las pantallas LCD 16x2, y los relés.

2. Implementación del Sistema de Medición de Resistencia:

- Se llevará a cabo la implementación de un sistema de medición de resistencia de puesta a tierra utilizando los sensores adecuados.
- Se verificarán las mediciones de resistencia y se comprobará que el sistema funcione correctamente con la configuración de los módulos y las conexiones electrónicas.

3. Desarrollo de la Interfaz HTML y Conexión con JavaScript:

- Se diseñará la interfaz **HTML** que permitirá la interacción del usuario con el sistema. Esta interfaz incluirá las pantallas previamente definidas, como login, configuración, visualización de registros, etc.
- Se integrará **JavaScript** para manejar las interacciones de la interfaz con el **ESP32**, permitiendo la actualización dinámica de los datos y la correcta comunicación entre la interfaz web y el hardware.

4. Desarrollo del Firmware y Programación del ESP32:

- Todo el **firmware** y la programación para controlar el **ESP32**, así como las interacciones entre la interfaz HTML y el microcontrolador, se alojarán directamente en el **ESP32**.
- El **ESP32** gestionará tanto la comunicación con los módulos como la ejecución de las funciones necesarias para medir la resistencia, almacenar registros y manejar la autenticación biométrica.

5. **Almacenamiento de Datos en la SD:**

- Se empleará una tarjeta **SD** para almacenar únicamente los datos relevantes, como los registros históricos de medición de resistencia, las imágenes asociadas al registro de usuarios (biometría) y otros archivos no esenciales para el funcionamiento en tiempo real.
- El uso de la SD permitirá optimizar el espacio de memoria del **ESP32** y facilitar el almacenamiento a largo plazo sin sobrecargar el microcontrolador.

6. **Pruebas de Concepto Rápidas:**

- Se realizarán pruebas iniciales de los componentes electrónicos, validando la medición de resistencia y la autenticación biométrica con el sensor **AS608**.
- Las pruebas de concepto permitirán iterar rápidamente sobre los posibles problemas y realizar ajustes necesarios en el diseño, el firmware o las interacciones de la interfaz.

7. **Evaluación Temprana del Funcionamiento:**

- Durante esta fase, se validará la efectividad de la medición de resistencia de puesta a tierra, la autenticación biométrica y la interacción de la interfaz web con el hardware.
- Las pruebas de concepto se harán en ciclos rápidos, permitiendo ajustes en tiempo real y la mejora continua del prototipo.

Método:

Se emplea el **Prototipado Rápido** para crear una versión funcional básica del sistema. Esta fase se llevará a cabo de manera ágil, iterando rápidamente basándose en los resultados obtenidos de las pruebas y la retroalimentación. Cada ciclo de prototipado permitirá ajustar el sistema, corregir fallos y afinar la comunicación entre los módulos, la interfaz HTML y el **ESP32**. Esta metodología busca validar las ideas clave del sistema de manera eficiente, para luego pasar a la fase de desarrollo final.

3.1.2 Fase 3: Evaluación y Retroalimentación (Agile)

Objetivo: Obtener retroalimentación sobre la funcionalidad del prototipo y realizar ajustes antes del desarrollo integral.

Actividades:

Pruebas de usuario con personal técnico para validar la usabilidad y eficacia del sistema de medición.

Análisis de datos obtenidos durante las pruebas para evaluar la precisión de las mediciones y la efectividad de la autenticación biométrica.

Revisión de la retroalimentación para identificar áreas de mejora y realizar ajustes.

Método: Se realiza un proceso **iterativo** y **ágil**, donde las pruebas de usuario y la retroalimentación continua permiten mejorar el prototipo de forma rápida antes de la siguiente fase de desarrollo.

Fase 4: Desarrollo Integral y Refinamiento (Waterfall + Agile)

Objetivo: Refinar el prototipo en un sistema completo e integrado, asegurando el cumplimiento de todos los requisitos técnicos y normativos.

Actividades:

Desarrollo completo del sistema, integrando el hardware y software, y asegurando que todos los componentes funcionen correctamente en conjunto.

Optimización del firmware y los algoritmos de medición para asegurar precisión y confiabilidad.

Diseño de la interfaz web utilizando HTML, CSS y JavaScript para la visualización y gestión de datos.

Integración de medidas de seguridad necesarias para cumplir con las normativas de protección de datos personales.

Método: Se emplea **Agile** para iterar y ajustar las funcionalidades, asegurando un desarrollo progresivo del sistema mientras se realiza una integración estructurada y exhaustiva del sistema final utilizando el enfoque de **Waterfall**.

Fase 5: Implementación y Evaluación Final (Waterfall + Agile)

Objetivo: Implementar el sistema en un entorno real y evaluar su desempeño bajo condiciones operativas.

Actividades:

Instalación y configuración del sistema en un entorno piloto dentro de una empresa de telecomunicaciones o un entorno industrial similar.

Realización de pruebas de campo para validar el rendimiento del sistema y verificar que cumpla con los estándares de seguridad y medición establecidos.

Evaluación del impacto del sistema en la mejora de la seguridad electrostática y la eficiencia operativa.

Método: Se implementa el sistema en un entorno real y se realizan pruebas exhaustivas bajo condiciones operativas. Se emplea **Waterfall** para gestionar la instalación y pruebas finales, asegurando una transición estable del desarrollo al despliegue real.

3.1.3 Iteración y Retroalimentación Continua

A lo largo de todo el proceso metodológico, se dará lugar a la retroalimentación continua y la iteración de prototipos. Durante las fases de **Prototipado Rápido** y **Evaluación**, se realizarán ajustes rápidos en función de los resultados obtenidos. Este enfoque ágil de iteración constante garantiza que el sistema evolucione y mejore a lo largo de las fases del proyecto, permitiendo adaptar el desarrollo de acuerdo con las necesidades emergentes.

3.1.4 Herramientas y Técnicas Empleadas

Prototipado rápido: Herramientas como **Arduino IDE**, **Fritzing**, plataformas de hardware como **ESP32**, y software de diseño como **agle para diseño de diagnnmas eléctricos**.

Desarrollo integral: Lenguajes de programación como **C++** (para la programación del **ESP32**), **JavaScript**, **HTML**, **CSS** para la interfaz web, y **MySQL** para la gestión de bases de datos.

3.1.5 Conclusión del Enfoque Metodológico

El enfoque híbrido de **Waterfall**, **Agile** y **Prototipado Rápido** adoptado en este proyecto permite combinar la estructura necesaria para la planificación inicial y la integración del sistema (Waterfall) con la flexibilidad y adaptación de un enfoque ágil durante el desarrollo. Además, el **Prototipado Rápido** posibilita la validación temprana de ideas clave, garantizando que el sistema evolucione de manera eficiente y se ajuste a las expectativas y requisitos del usuario. Este enfoque metodológico garantizará un sistema robusto, preciso y ajustado a los estándares de seguridad y medición, optimizando la gestión de la puesta a tierra en entornos industriales y mejorando la protección contra descargas electrostáticas.

CAPÍTULO 4.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Fase 1: Investigación y Definición de Requisitos (Waterfall)

Objetivo: El objetivo de esta fase es establecer una comprensión clara y detallada de las necesidades del sistema, los requisitos técnicos y las normativas aplicables, en particular las regulaciones **ANSI/ESD S20.20**, que guiarán el diseño y desarrollo del dispositivo **SGR (Staff Grounding Recorder)** **Aplicación de la Metodología Waterfall:** En esta fase, se sigue un enfoque **Waterfall** de manera estructurada, donde se completan todas las actividades de manera secuencial y se documentan detalladamente los requisitos antes de avanzar a las siguientes fases. Cada paso es fundamental para definir claramente las especificaciones del sistema.

4.1.1 Revisión de literatura sobre tecnologías de medición de puesta a tierra y seguridad ESD – Hallazgos clave aplicables al SGR:

- **Rango de resistencia aceptable:** Según las normativas ANSI/ESD S20.20 y ESD TR53, el calzado ESD debe mantener una resistencia entre $1.0 \times 10^6 \Omega$ (1 M Ω) y $1.0 \times 10^9 \Omega$ (1 G Ω) respecto al suelo, estableciendo así el rango operativo de referencia para sistemas de verificación como el SGR. Sin embargo, en la práctica industrial, los procedimientos de verificación rutinaria del personal utilizan un rango más acotado, típicamente entre 1 M Ω y 35 M Ω , al emplear medidores que no consideran el sistema completo suelo-persona, sino únicamente la resistencia del calzado a través del cuerpo hacia una placa conductora. Esta diferencia es relevante para el diseño del SGR, ya que debe ajustarse a los criterios operativos reales sin comprometer el cumplimiento normativo, incluso si no se evalúa la resistencia total del sistema suelo-calzado-persona.
- **Medición bajo condiciones reales:** Es necesario aplicar una tensión de prueba estándar de 100 V DC ($\pm 5\%$) en dispositivos de medición de resistencia para asegurar precisión, especialmente en entornos industriales con humedad y temperatura variables.
- **Medición en tiempo real al ingreso del personal:** Se identifica una tendencia creciente hacia sistemas automatizados de verificación de puesta a tierra ubicados en accesos a zonas EPA (Electrostatic Protected Area), lo cual respalda el enfoque del SGR como herramienta de validación diaria del personal.
- **Verificación de conexión a tierra a través del cuerpo:** Algunos sistemas avanzados no solo miden el calzado, sino también la resistencia a través del cuerpo humano al estar en contacto con las placas metálicas, garantizando un trayecto completo de descarga hacia tierra. Esta funcionalidad es relevante para robustecer el diseño del SGR.
- **Compatibilidad con sistemas de acceso:** La integración del medidor con sistemas de control de acceso (torniquetes, lectores RFID) permite condicionar la entrada del personal según los resultados de la prueba, aumentando la eficiencia del control ESD. Esta capacidad puede ser incluida como mejora funcional del SGR.

4.1.2 Análisis y definición de las normativas ESD – Puntos clave aplicables al SGR:

- **Norma central: ANSI/ESD S20.20:** Establece los requisitos para sistemas de protección ESD, incluyendo la verificación periódica de dispositivos de puesta a tierra personal (calzado, muñequeras). El SGR debe ser capaz de **verificar cumplimiento en menos de 3 segundos** para no interrumpir los procesos.
- **Requisitos de calibración y trazabilidad:** Todo equipo de medición, incluido el SGR, debe ser calibrado regularmente y contar con **trazabilidad metrológica conforme a ISO/IEC 17025**. Esto implica que el diseño debe considerar procedimientos de calibración accesibles.
- **Validación y documentación de resultados:** Las normativas exigen **registro de mediciones y trazabilidad del cumplimiento**. Se recomienda que el SGR incluya capacidad de almacenamiento local o en red para auditorías ESD.
- **Evaluación de desempeño de los dispositivos ESD:** Según ESD TR53, deben realizarse pruebas de desempeño del equipo (como el SGR) con una frecuencia mínima semanal, lo cual puede automatizarse con funciones internas de autodiagnóstico.

4.1.3 Identificación de tecnologías biométricas – Hallazgos clave aplicables al SGR

Aplicación:

En el contexto del SGR, se investigaron tecnologías biométricas que permitan **identificar y autenticar de forma confiable al personal** que se somete a la prueba de resistencia, garantizando trazabilidad y control de acceso en zonas EPA (Electrostatic Protected Area). La combinación de sensores biométricos con el sistema de medición permite asociar cada resultado a un individuo específico, fortaleciendo la seguridad del sistema ESD.

4.1.3.1 Tecnologías biométricas evaluadas:

- **Sensores de huella digital capacitivos y ópticos:**
 - Se analizó el desempeño de sensores como el **AS608**, un sensor óptico compacto ampliamente utilizado en sistemas embebidos. Este módulo es capaz de capturar, comparar y almacenar huellas digitales con tiempos de respuesta inferiores a 1 segundo.
 - Su ventaja principal es la **integración sencilla con microcontroladores** como el ESP32 mediante UART, así como su bajo consumo energético, bajo costo y disponibilidad comercial.

- Tiene una memoria interna para hasta **162 plantillas de huella**, lo que lo hace adecuado para entornos industriales con personal rotativo o múltiples turnos.
- **Alternativas exploradas:**
 - **Sensores capacitivos (e.g., FPC1020, GT-521F32):** Ofrecen mayor resistencia al polvo y menores dimensiones, pero implican mayor complejidad de integración y suelen requerir más recursos computacionales.
 - **Reconocimiento facial o RFID:** Aunque viables, se descartaron por requerir hardware más costoso, mayor tiempo de respuesta o menor confiabilidad en entornos con iluminación variable o presencia de ESD.

4.1.3.2 Integración con sistema SGR:

- El sensor de huella AS608 puede operar en conjunto con un **ESP32**, que actúa como unidad central del sistema. El ESP32 gestiona la identificación biométrica y simultáneamente **coordina la medición de resistencia del calzado**, permitiendo una verificación doble (identidad + cumplimiento ESD).
- El ESP32, al contar con **conectividad Wi-Fi y Bluetooth**, permite además enviar registros a una base de datos remota o integrarse con sistemas SCADA, control de acceso o dashboards industriales.

4.1.3.3 Ventajas clave para el SGR:

- **Verificación personalizada:** Se asegura que cada medición esté vinculada a un usuario único, cumpliendo con requisitos de trazabilidad y auditoría.
- **Evita suplantación de identidad:** El uso de biometría impide que un trabajador realice la prueba por otro, asegurando la validez del control.
- **Automatización y control de acceso:** Puede condicionarse la apertura de puertas, torniquetes o activación de luces/señales según el resultado de la medición y la validación biométrica.

4.1.3.4 Especificaciones y Características AS608

- Tipo: Sensor Huella Dactilar Digital
- Modelo: AS608
- Voltaje de alimentación: 3.6 a 6.0 VDC
- Corriente de funcionamiento: 120mA
- Pico de corriente: 150mA

“ Creación del SGR (Staff Grounding Recorder)”

- Interfaz: Serial, UART, TTL
- Tiempo de adquisición menor a 1 segundo
- Velocidad de transmisión: 9600, 19200, 28800, 38400, 57600 (Por defecto es 57600)
- Capacidad de almacenamiento: 140 platillas
- 5 Niveles de seguridad
- Temperatura de operación: -20°C a 50°C (Humedad Relativa 40% a 85%)
- Área de ventana: 14 mm x 18 mm
- Dimensiones del producto : 48 x 23.5 x 20mm
- Peso: 20g

Figura 18 AS608 con accesorios



Nota: Elaboración Propia

4.1.4 Definición de requisitos técnicos y componentes electrónicos:

Aplicación: Se definen los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del dispositivo, como las **pantallas LCD**, los módulos de **RTC** para registrar la hora exacta, y los protocolos de comunicación (**UART, SPI, I2C**) para asegurar que todos los componentes funcionen de manera eficiente. Cada componente se selecciona para cumplir con los requisitos técnicos y de seguridad del sistema.

Lista de los componentes electrónicos seleccionados para el **Sistema de Gestión de Resistencia (SGR)**, de acuerdo con la definición de requisitos técnicos y las necesidades de comunicación y seguridad:

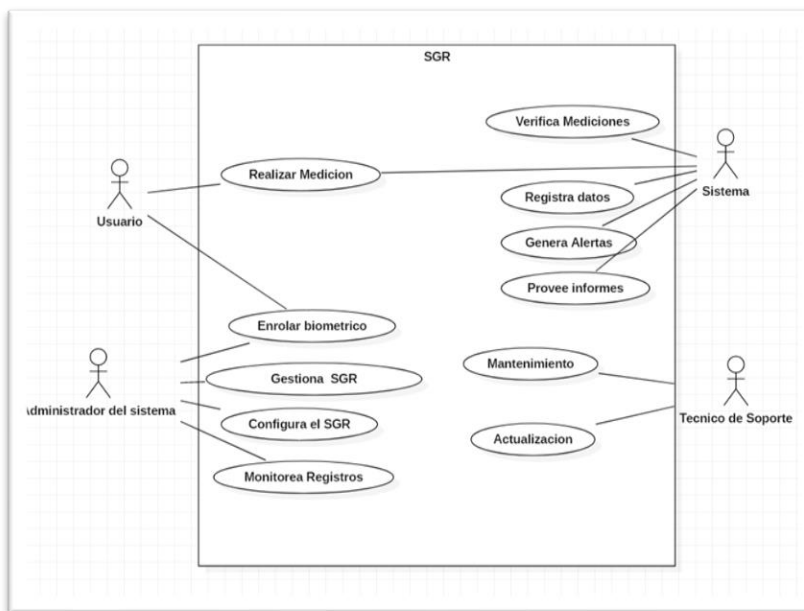
- **Pantalla LCD 16x2:** Muestra información del sistema, como mediciones y mensajes.
- **Módulo RTC DS1307:** Registra la hora exacta, incluso cuando el sistema está apagado.
- **Modulo ADC**
- **Microcontrolador ESP32 S3:** Coordina las funciones del sistema y controla los dispositivos.
- **Sensor Biométrico AS608:** Para autenticar usuarios mediante huellas dactilares.
- **Relé de 5V:** Controla dispositivos de alta potencia y activa sistemas.
- **Módulos de Comunicación (UART, SPI, I2C):** Para conectar y comunicar los diferentes módulos (incluyendo el uso de I2C para LCD y otros sensores).
- **Alimentación:** Fuentes para proporcionar energía al sistema. Ejemplo: Fuente de 5V, batería Li-Po.
- **Botones y Sensores de Entrada:** Para interacción manual con el sistema. Ejemplo: Botones táctiles, sensores capacitivos.
- **Conectores y Cables Dupont:** Facilitan las conexiones rápidas entre los módulos durante las pruebas.
- **Módulo de Alarma o Indicadores LED:** Para mostrar alertas visuales o sonoras. Ejemplo: LEDs RGB, buzzer.
- **Placa Base para ESP32:** Placa expansora para realizar conexiones rápidas y facilitar el prototipado.

4.1.5 Boceto de diagramas a nivel usuario:

Aplicación: Se crean diagramas de flujo de usuario, diagramas de interacción con la interfaz y diagramas de procesos del sistema. Estos diagramas describen cómo el **empleado** interactúa con el dispositivo (por ejemplo, validando la huella digital, visualizando el resultado en la pantalla LCD) y cómo el **sistema** responde (indicadores rojos o verdes en función de la validación). Los diagramas también detallan cómo los administradores pueden consultar los registros a través de la interfaz web.

4.1.5.1 Diagrama de Casos de Uso.

Figura 19 Diagrama de casos de uso



Nota: Elaboración Propia

Actores en el Diagrama de Casos de Uso:

1. Administrador del Sistema
 - Gestiona el sistema de manera general.
 - Configura el sistema, incluyendo los rangos aceptables de resistencia de puesta a tierra.
 - Monitorea los registros y puede acceder a informes detallados.
 - Realiza la gestión de usuarios y empleados en el sistema.
2. Empleado
 - Realiza la medición de puesta a tierra (conectándose al sistema SGR mediante dispositivos).
 - Enrolamiento biométrico (captura y verificación de huellas dactilares).
 - Recibe alertas o notificaciones sobre la medición de resistencia.

3. Sistema (SGR)

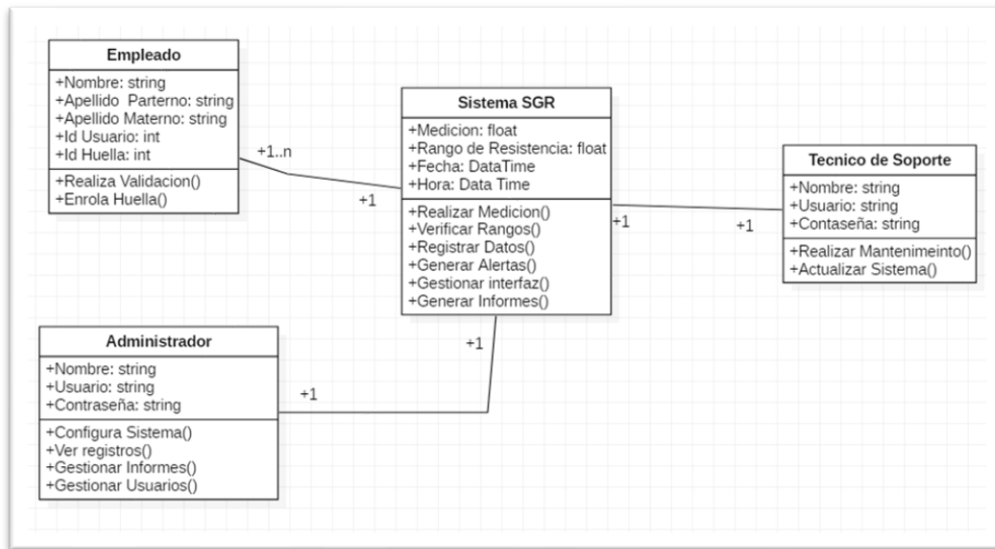
- Realiza las mediciones de resistencia a tierra.
- Verifica las mediciones con los rangos de resistencia aceptables (basado en normas como ANSI ESD 2020).
- Registra los datos (mediciones y datos biométricos) en la base de datos.
- Genera alertas si los valores de resistencia están fuera del rango aceptable.
- Provee informes a través de la interfaz web.

4. Técnico de Soporte

- Ayuda en la mantenimiento y reparación del sistema (hardware o software).
- Realiza actualizaciones del sistema según sea necesario.

4.1.5.2 Diagrama de Clases:

Figura 20 Diagrama de Clases



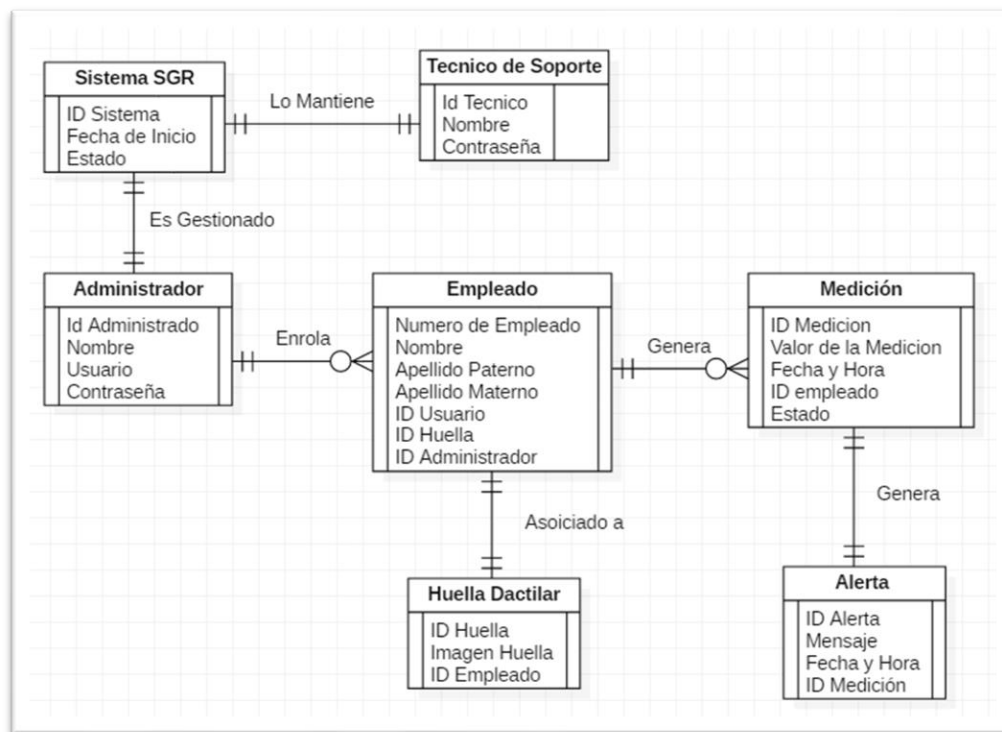
Nota: Elaboración Propia

Explicación de las Relaciones y Métodos:

1. Administrador - SistemaSGR:
 - El Administrador configura los rangos de resistencia y gestiona el sistema en su totalidad, lo que incluye el monitoreo de registros e informes.
2. Empleado - SistemaSGR:
 - El Empleado puede realizar mediciones de resistencia con el SistemaSGR y es responsable de enrolar su huella dactilar para la identificación biométrica. Además, recibe alertas si las mediciones están fuera del rango de seguridad.
3. Sistema SGR - Empleado:
 - El SistemaSGR valida las mediciones de resistencia y envía alertas al Empleado si la medición es fuera de los rangos aceptables, basado en la norma ANSI ESD 2020.
4. Tecnico Soporte - SistemaSGR:
 - El Técnico de Soporte está encargado de realizar mantenimientos y actualizaciones en el sistema SistemaSGR, tanto en el hardware como en el software.

4.1.5.3 Diagrama de Entidad Relación.

Figura 21 Diagrama ER



Nota: Elaboración Propia

Explicación del Diagrama ER:

1. SGR (Sistema):

- idSistema: Identificador único para el sistema SGR.
- fechaHoraInicio: Fecha y hora cuando el sistema SGR fue iniciado.
- estado: Estado actual del sistema (por ejemplo, activo, en mantenimiento, etc.).
- El SGR interactúa con Medición, Empleado, y Administrador.

2. Medición:

- idMedicion: Identificador único para cada medición realizada.
- valorResistencia: El valor de la medición de resistencia a tierra.
- fechaHora: Fecha y hora en la que se registró la medición.
- estado: El estado de la medición (Correcta/Incorrecta).
- idEmpleado: El Empleado que realizó la medición.

3. Empleado:

- idEmpleado: Identificador único del empleado.
- nombre, apellidoPaterno, apellidoMaterno: Datos personales del empleado.
- idAdministrador: Relación con el Administrador que gestiona el sistema.

- Huella Dactilar: El empleado tiene una Huella Dactilar asociada que se utiliza para la autenticación al momento de usar el SGR.
- 4. Huella Dactilar:
 - idHuella: Identificador único para cada huella registrada.
 - imagenHuella: La imagen de la huella dactilar para la verificación.
 - idEmpleado: Relación con el Empleado correspondiente, indicando qué huella pertenece a qué empleado.
- 5. Administrador:
 - idAdministrador: Identificador único del administrador.
 - nombre, usuario, clave: Datos del administrador.
 - El Administrador gestiona el SGR, puede consultar registros, añadir y eliminar empleados.
- 6. Técnico de Soporte:
 - idTecnico: Identificador único del técnico.
 - nombre, especializacion: Datos del técnico encargado de mantener y actualizar el sistema SGR.
 - El Técnico de Soporte mantiene el SGR (por ejemplo, actualiza el software, realiza mantenimientos).

Relaciones:

1. SGR ↔ Medición: El SGR realiza y registra las mediciones. Cada medición es vinculada a un Empleado específico que la realiza.
2. SGR ↔ Administrador: El Administrador gestiona el sistema SGR (configura, consulta registros, gestiona empleados).
3. Empleado ↔ Huella Dactilar: Cada Empleado tiene una Huella Dactilar asociada que se utiliza para la autenticación en el sistema.
4. SGR ↔ Técnico de Soporte: El Técnico de Soporte mantiene y actualiza el sistema SGR.
5. Medición ↔ Empleado: Cada medición de puesta a tierra está vinculada a un Empleado que la realizó.

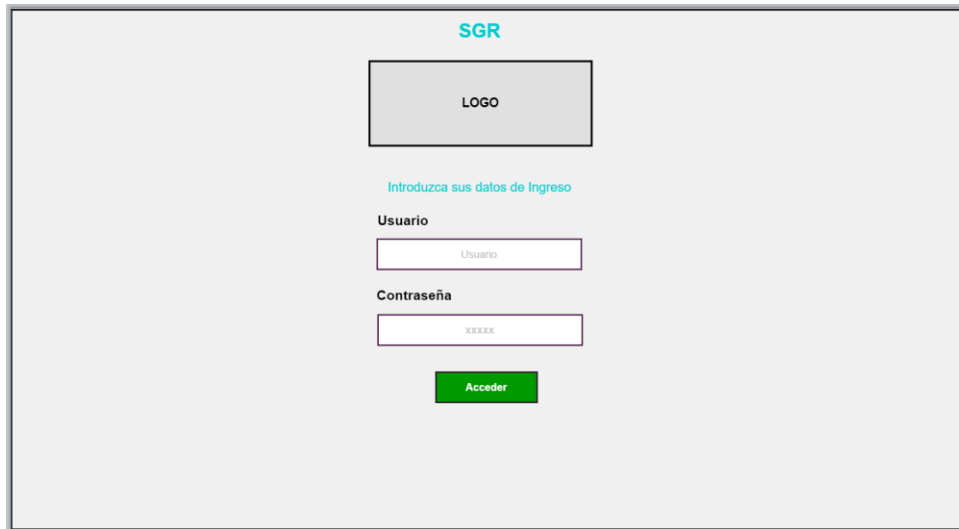
4.1.6 Bocetos de Interfaz de Usuario:

Se ha desarrollado un boceto de la interfaz de usuario utilizando **Pencil Project**, una herramienta de prototipado de interfaces gráficas. El prototipo incluye la creación de pantallas HTML representativas, que abarcan las vistas principales del sistema, formularios de configuración y la visualización de mediciones. Este diseño inicial permite simular cómo interactuarán los usuarios con el sistema, asegurando que la interfaz sea intuitiva y cumpla con los requisitos funcionales del proyecto.

Las pantallas diseñadas incluyen:

Pantalla de Login: Donde los usuarios ingresan sus credenciales para acceder al sistema. Esta pantalla incluye campos para nombre de usuario y contraseña, así como botones para el inicio de sesión.

Figura 22 Pantalla Login



Nota: Elaboración Propia

“ Creación del SGR (Staff Grounding Recorder)”

Pantalla de Inicio: Una vista principal donde los usuarios pueden navegar a otras secciones del sistema, como la visualización de registros, configuración, o creación de nuevos IDs. Esta pantalla sirve como centro de control para el sistema.

Figura 23 Pantalla Inicio



Nota: Elaboración Propia

Pantalla de Visualización de Registros: Muestra un historial de las mediciones realizadas, con la fecha, hora, y valores de resistencia registrados. Los usuarios pueden revisar los datos históricos de medición de manera clara y ordenada.

Figura 24 Pantalla de Registros



Nota: Elaboración Propia

Pantalla de Nuevo ID: Permite a los usuarios crear y registrar nuevos IDs biométricos (como huellas dactilares) para acceder al sistema. Se incluyen instrucciones para agregar un nuevo usuario y realizar la validación biométrica.

Figura 25 Pantalla de Nuevo ID

SGR

LOGO

Inicio Registros Nuevo ID Usuarios Desarrollador

No. de Empleado

Nombre (s)

Apellido Paterno

Apellido Materno

Apellido Materno

Nota: Elaboración Propia

Pantalla de Visualización de Usuarios: Permite a los administradores o usuarios autorizados ver una lista de los usuarios registrados en el sistema. Se pueden consultar los datos de cada usuario, como el nombre, ID biométrico y el estado de la cuenta.

Figura 26 Pantalla de Usuarios

SGR

LOGO

Inicio Registros Nuevo ID Usuarios Desarrollador

☐	Id Huella	Numero de Empleado	Nombre	Apellido Paterno	Apellido Materno
☐	1	GT-028	Francisco Javier	Reyes	Reyes
☐	2	GT-029	Sarah Alai	Reyes	Reyes

Nota: Elaboración Propia

Pantalla de Configuraciones: Aquí los usuarios pueden ajustar parámetros del sistema, como la configuración del RTC, opciones de comunicación, y la calibración de medición de resistencia. Esta pantalla ofrece opciones avanzadas para personalizar el funcionamiento del sistema.

Figura 27 Pantalla de Configuraciones



Nota: Elaboración Propia

Método: Se utiliza el enfoque **Waterfall** para esta fase, asegurando que los requisitos sean completamente documentados y entendidos antes de avanzar con el desarrollo del sistema. Cada actividad se realiza de forma secuencial, con un fuerte enfoque en la documentación detallada y el análisis de cada componente, lo que reduce el riesgo de errores en fases posteriores.

Fase 2: Prototipado Rápido Inicial (Prototipado Rápido + Agile)

Objetivo:

Desarrollar un prototipo funcional básico que permita validar las ideas clave del sistema, como la medición de resistencia, el uso de tecnologías biométricas para la autenticación y la interacción del sistema con diferentes módulos electrónicos. Establecer las conexiones del prototipo utilizando el **Arduino IDE** para programar el **ESP32**, y configurar la comunicación con los módulos electrónicos, como el sensor biométrico **AS608**, el módulo **RTC DS1307**, el módulo **ADC (SGM58031)**, la pantallas **LCD 20x4**, y los relés de **5V**.

4.2.1 Selección de Herramientas y Preparación del Entorno

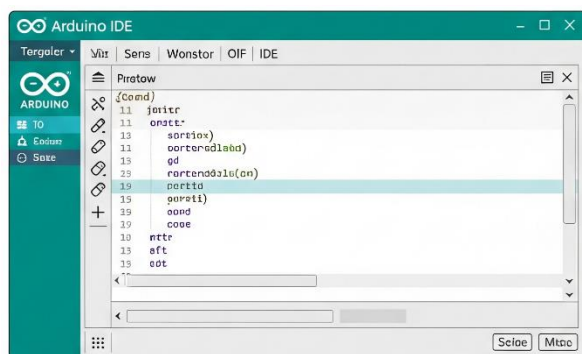
1. Instalar Arduino IDE:

- Instalación de la última versión del **Arduino IDE**.
- Configurar el soporte para el **ESP32** en el Arduino IDE.

2. Bibliotecas Requeridas:

- Se instalan las bibliotecas necesarias para interactuar con los módulos:
 - **Sensor biométrico AS608:** biblioteca **Adafruit_Fingerprint**.
 - **Sensor ADC (SGM58031):** biblioteca **SGM58031**.
 - **Módulo RTC DS1307:** Biblioteca **Wire.h** para comunicación I2C y **RTCLib.h** para controlar el módulo RTC.
 - **Pantalla LCD 16x2:** Biblioteca **LiquidCrystal_I2C.h** para control de pantallas LCD I2C.

Figura 28 ID arduino



Nota: Elaboración Propia

4.2.2 Conexión de los Módulos al ESP32

El desarrollo del Sistema de Gestión de Resistencia (SGR) se llevó a cabo mediante un enfoque de **prototipado funcional**, utilizando **plataformas de código abierto**.

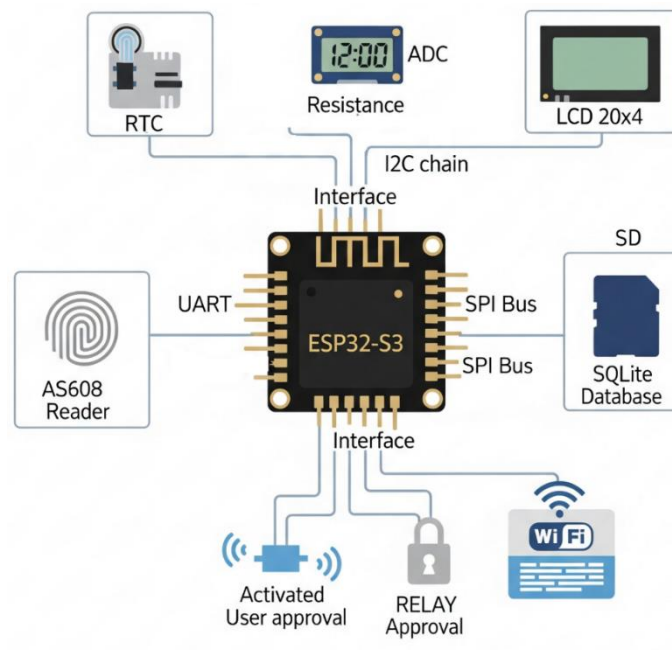
1. Arquitectura de Hardware: El SGR se basa en un microcontrolador **ESP32-S3**, equipado con 16 MB de memoria Flash y 8 MB de memoria RAM. Este integra los siguientes componentes principales:

- **Sensor de Huella AS608:** Para la autenticación biométrica de usuarios.

“ Creación del SGR (Staff Grounding Recorder)”

- **Módulo RTC (Real Time Clock):** Asegura el registro preciso de la fecha y hora para cada evento y medición.
- **Módulo ADC (SGM58031):** Para la adquisición de datos de resistencia.
- **Pantalla LCD 20x4:** Para visualización local de información.
- **Tarjeta SD:** Utilizada para el almacenamiento persistente de las bases de datos.
- **Relé:** Actuador digital para el control de accesos (ej. puertas, torniquetes).

Figura 29 Esquema de la interacción de un sistema de medición biométrico



Nota: Elaboración Propia

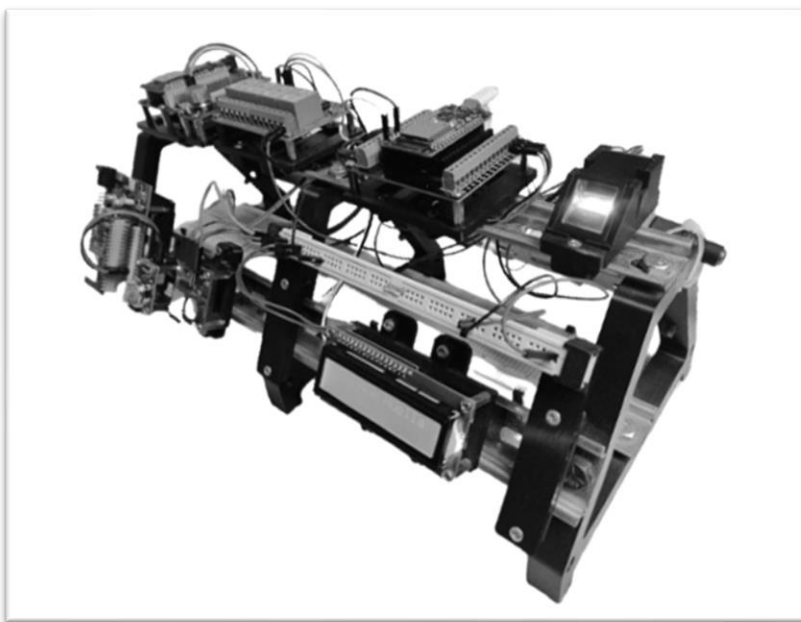
2. Entorno de Desarrollo y Programación: La programación del microcontrolador se realizó en **C++** utilizando el **IDE de Arduino**. La **interfaz web** se construyó empleando tecnologías estándar: **HTML, CSS y JavaScript**. El intercambio de datos entre el cliente (interfaz web) y el servidor (ESP32-S3) se gestiona mediante el formato **JSON**. (Figura 29)

4.2.3 Diseño de la Estructura de Conexión

El diseño de las conexiones físicas debe estar bien documentado para evitar errores y facilitar el prototipado. A continuación, se presenta un esquema general de las conexiones:

- **ESP32:**

Figura 30 Prototipo Inicial SGR



Nota: Elaboración Propia

4.2.4 Programación Inicial del Sistema

El desarrollo del **Staff Grounding Recorder (SGR)** se basará en una programación estructurada que involucra varios lenguajes y entornos para garantizar un sistema eficiente y fácil de manejar. La programación se abordará mediante las siguientes herramientas y lenguajes:

Arduino IDE (Lenguaje C/C++):

Se utilizará el **Arduino IDE** para programar el microcontrolador **ESP32**. Este entorno es ideal para el desarrollo de firmware debido a su flexibilidad y amplio soporte para bibliotecas de hardware. El **lenguaje de programación C/C++** será utilizado para interactuar con los diferentes módulos electrónicos, como el sensor **AS608**, el módulo **RTC DS1307**, el LCD **16x2**, y el control de los **relés de 5V**.

Lenguaje HTML (Interfaz Web):

La interfaz de usuario del SGR será una plataforma web accesible a través de un navegador. Para esto, se utilizará **HTML** para estructurar las páginas de la interfaz, como la pantalla de inicio, visualización de registros y configuraciones. El HTML proporcionará la base visual del sistema, mostrando las mediciones de resistencia de manera clara y permitiendo la interacción con el usuario para gestionar datos y configuraciones.

Lenguaje JavaScript (Interactividad y Conexión con ESP32):

JavaScript se usará para proporcionar la interactividad en la interfaz web. Este lenguaje permitirá que la página HTML interactúe con el **ESP32**, enviando y recibiendo datos en tiempo real. Además, JavaScript facilitará la actualización dinámica de los datos visualizados (como mediciones de resistencia de puesta a tierra), así como la gestión de las configuraciones de usuario y otros parámetros del sistema.

La combinación de **C/C++** para el desarrollo del firmware del **ESP32**, **HTML** para la interfaz web y **JavaScript** para la interacción en tiempo real asegurará un flujo de trabajo eficiente y funcional para el **SGR**, permitiendo tanto la recopilación precisa de datos como una experiencia de usuario ágil y moderna.

4.2.5 Módulo de Medición de Resistencia de Puesta a Tierra (ESP32 + SGM58031)

El sistema de medición de resistencia de puesta a tierra se rediseñó para mejorar la precisión y confiabilidad en entornos industriales, incorporando el microcontrolador **ESP32**, el **módulo ADC externo SGM58031** y un **amplificador operacional rail-to-rail MCP6002**. Esta arquitectura permite obtener mediciones más precisas y estables, esenciales para verificar el cumplimiento de las normativas **ANSI ESD 2020**.

Figura 31 ADC SGM58031



Nota: Elaboración Propia

Desarrollo del módulo:

Circuito de medición:

Se utilizó un circuito de prueba que incluye una **placa metálica** y **calzado conductor**, que cierra el circuito a través del cuerpo del operario, permitiendo medir la resistencia total hacia tierra.

Acondicionamiento de señal:

Debido a que el ADC interno del ESP32 presentó **lecturas erróneas causadas por la alta impedancia de entrada**, se incorporó un **amplificador operacional rail-to-rail MCP6002** como etapa de búfer entre el sensor y el ADC externo. Esto redujo significativamente la interferencia y estabilizó la señal analógica antes de ser digitalizada.

Conversión analógico-digital con SGM58031:

El ADC interno del ESP32 fue sustituido en este módulo por el **SGM58031**, un convertidor analógico-digital de 16 bits con arquitectura delta-sigma, alta precisión y bajo consumo. Este ADC externo se comunica vía **I²C** con el ESP32, permitiendo una medición más precisa del voltaje en el circuito. La resistencia del operario se calcula a partir de esta lectura utilizando la Ley de Ohm.

Procesamiento y almacenamiento de datos:

El valor de la resistencia calculado se almacena junto con la **fecha y hora exactas** provistas por el **módulo RTC** en una base de datos interna. Esta información está disponible en tiempo real y de forma histórica a través de la interfaz web del sistema.



Pruebas realizadas:

Pruebas de exactitud:

El sistema fue calibrado utilizando resistencias patrón y sujetos de prueba con distintos niveles de resistencia. Se validó que los valores medidos se mantuvieran dentro del rango aceptable definido por la norma ANSI ESD 2020 (usualmente $< 1 \text{ M}\Omega$ para conexión de personal a tierra).

Pruebas de consistencia:

Se ejecutaron pruebas continuas durante largos periodos para asegurar que el sistema pudiera mantener **lecturas estables y repetibles**, sin variaciones espurias ni pérdidas de precisión.

Validación del acondicionamiento de señal:

Se compararon lecturas con y sin el uso del amplificador MCP6002, demostrando una mejora significativa en la linealidad y estabilidad de la señal cuando este componente está presente.

La inclusión del **SGM58031** y del **MCP6002** ha permitido superar las limitaciones del ADC interno del ESP32, garantizando una medición confiable de la resistencia de puesta a tierra del personal. Este módulo se convierte así en una parte fundamental del sistema SGR, aportando la precisión necesaria para cumplir con estándares industriales y normativos.

4.2.6 Módulo de Autenticación Biométrica (AS608)

El sensor biométrico **AS608** es el componente clave del sistema para la autenticación de usuarios mediante huellas digitales. Su integración fue crítica para asegurar el acceso exclusivo a usuarios autorizados, aportando una capa adicional de seguridad al sistema Staff Grounding Recorder (SGR).

4.2.6.1 Desarrollo del módulo

Interfaz Arduino con AS608:

El sensor AS608 se conecta al microcontrolador **ESP32-S3** utilizando el protocolo **UART** (comunicación serie). La programación se llevó a cabo en el entorno **Arduino IDE**, utilizando la librería **Adafruit-Fingerprint**, que ofrece un conjunto de funciones para capturar, enrolar, buscar y comparar huellas digitales de manera eficiente.

Figura 32 Lector Biometrico



Nota: Elaboración Propia

Funciones personalizadas del sistema SGR:

Debido a los requerimientos específicos del proyecto, se desarrollaron **funciones propias adaptadas al flujo del sistema**, tales como:

Gestión del proceso de enrolamiento con control de tiempos entre captura y confirmación de la huella.

Se envían de todos los **códigos de error generados por el AS608** a la interfaz web, en formato **JSON**, para su análisis y retroalimentación al usuario.

Implementación de un **escaneo continuo** del lector cada **50 milisegundos**, que permite detectar en tiempo real si una huella registrada ha sido colocada, manteniendo al sistema en modo de vigilancia activa permanente.

4.2.6.2 Etapas de elaboración del módulo biométrico

Fase inicial (Pruebas aisladas):

El módulo AS608 se probó inicialmente de forma independiente, sin integración a la interfaz web.

Se conectó directamente al ESP32-S3 y los datos fueron transmitidos por **monitor serial**, permitiendo validar las funcionalidades básicas de captura, búsqueda y enrolamiento.

Desarrollo de funciones propias:

Se programaron rutinas que permitieran mejorar la interacción usuario-dispositivo durante el enrolamiento, incluyendo:

Captura dual (para validar huella repetida).

Verificación inmediata post-enrolamiento.

Manejo completo de los códigos de error devueltos por el sensor (por ejemplo, dedo mal colocado, dedo duplicado, sensor ocupado, etc.).

Se optimizó el proceso para permitir **enrolamiento secuencial rápido** y seguimiento visual mediante la pantalla LCD del sistema.

Integración al prototipo final:

Una vez validadas las funciones en entorno aislado, se integraron al sistema completo junto con la **interfaz web embebida**.

La información sobre errores o resultados de autenticación fue enlazada al **panel web en tiempo real** mediante intercambio de datos en formato **JSON**, permitiendo al usuario visualizar directamente el estado de la autenticación.

4.2.6.3 Captura y almacenamiento de huellas

El sensor AS608 puede almacenar hasta **140 plantillas de huellas digitales** en su memoria interna.

Cada plantilla está **asociada a un ID biométrico**, que a su vez se vincula al número de empleado y otros datos en la base de datos de enrolamiento (guardada en la tarjeta SD en formato SQLite).

El proceso de enrolamiento se realiza en dos etapas (captura y confirmación), asegurando que la huella esté correctamente registrada.

4.2.6.4 Verificación en tiempo real

Durante el funcionamiento b del SGR, el sistema se mantiene en **modo de escaneo constante**.

Cuando se detecta la colocación de un dedo, el sistema realiza la comparación de la huella escaneada con todas las almacenadas en la memoria del sensor.

Si hay coincidencia, se genera una señal de autenticación positiva y se procede con la medición de resistencia.

En caso de no haber coincidencia, se informa al usuario mediante la interfaz web con un mensaje de acceso denegado.

4.2.6.5 Pruebas realizadas

Pruebas de precisión:

Se evaluó la capacidad del sensor para reconocer huellas bajo distintas condiciones físicas: presión variable del dedo, presencia de humedad o suciedad, y cambios leves en la posición.

Se obtuvo un alto porcentaje de coincidencia en huellas correctamente enroladas, con bajo índice de falsos negativos.

Pruebas de fiabilidad:

Se probó el comportamiento del sistema con múltiples huellas almacenadas.

Se verificó que el sistema pudiera autenticar correctamente al usuario correspondiente sin errores de indexación o pérdida de datos.

Se probaron escenarios de huellas duplicadas o huellas no enroladas, validando la respuesta correcta del sensor y del sistema general.

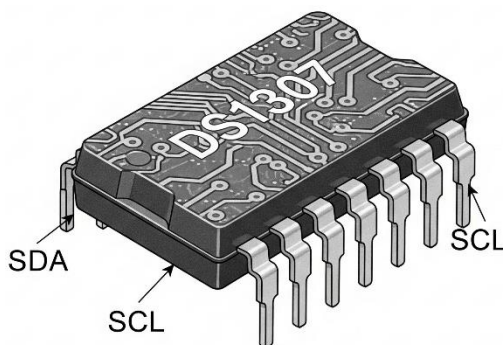
4.2.7 Módulo de RTC (DS1307)

El **RTC (Real-Time Clock)** es un módulo esencial para asegurar que las mediciones de resistencia y las huellas digitales estén registradas con la fecha y hora exacta. El **DS1307** es un reloj de tiempo real preciso que se integra con el **ESP32** mediante el protocolo **I2C**.

Desarrollo del módulo:

Configuración del RTC: Se configuró el módulo **DS1307** para que se sincronizara automáticamente con la hora al encender el sistema. Utilizando la librería **Wire.h** en **Arduino IDE**, el **ESP32** pudo leer la hora desde el **RTC** y asociarla a cada medición de resistencia y huella digital.

Figura 33 RTC Microchip



Nota: Elaboración Propia

Almacenamiento de la fecha y hora: La fecha y hora obtenidas del **RTC** se almacenan en la base de datos junto con los registros de medición de resistencia y huella digital.

Pruebas realizadas:

Sincronización de hora: Se verificó que el **RTC** mantuviera la hora exacta durante largos períodos sin necesidad de recalibración.

Integridad de registros temporales: Se comprobó que los datos de fecha y hora fueran precisos y estuvieran correctamente asociados con cada registro de medición.

4.2.8 Base de Datos (SQLite)

El sistema SGR utiliza una **base de datos SQLite** para almacenar los registros de usuarios, mediciones de resistencia y huellas digitales de manera segura. SQLite fue elegido por su simplicidad y capacidad de funcionar sin necesidad de un servidor dedicado.

Desarrollo del módulo:

Diseño de la base de datos: La base de datos contiene varias tablas:

Empleados: Incluye campos como nombre, apellido, número de empleado, huella digital (en formato binario) y un identificador único.

Mediciones de resistencia: Incluye campos como el valor de la resistencia, fecha, hora y el identificador del empleado que realizó la medición.

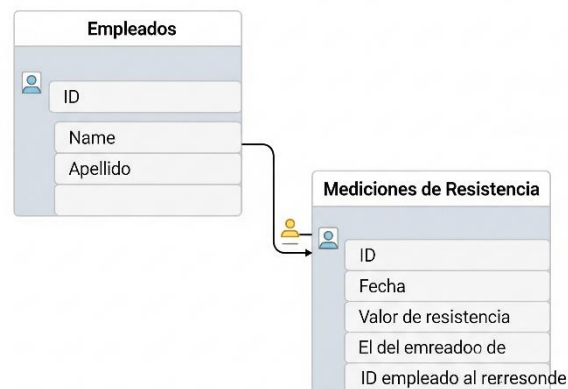
Interacción con la base de datos: Se utilizó **SQL** para crear, leer, actualizar y eliminar registros. Los registros de medición y huellas digitales se almacenan y se asocian a los usuarios mediante claves foráneas.

Pruebas realizadas:

Integridad de los datos: Se comprobó que los datos fueran almacenados correctamente y que las relaciones entre las tablas fueran precisas.

Consultas eficientes: Se realizaron pruebas de rendimiento para asegurarse de que las consultas y reportes de datos fueran rápidos y eficaces.

Figura 34 Base de Datos SQL



Nota: Elaboración Propia

4.2.9 Módulo de SD (Tarjeta SD)

El módulo de **tarjeta SD** permite almacenar registros históricos de medición, huellas digitales y otros datos relevantes. La tarjeta SD proporciona una solución adicional para la gestión de datos, especialmente para mantener un respaldo de los registros.

Desarrollo del módulo:

Almacenamiento de registros: Los registros se guardan en archivos CSV o JSON en la tarjeta SD. Estos archivos pueden ser exportados posteriormente para análisis.

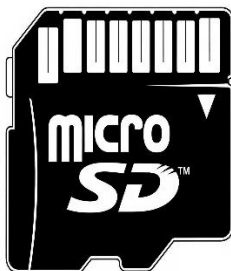
Integración con el ESP32: El **ESP32** se conecta a la tarjeta SD mediante el protocolo **SPI**. Usando la librería **SD.h**, se programó la escritura y lectura de datos.

Pruebas realizadas:

Verificación de escritura y lectura de datos: Se realizaron pruebas para asegurar que los datos se escribieran correctamente en la tarjeta SD y que pudieran leerse sin errores.

Gestión de espacio: Se verificó que el sistema manejara correctamente la capacidad de almacenamiento de la tarjeta SD, sin generar errores de escritura o sobrecarga.

Figura 35 SD



Nota: Elaboración Propia

4.2.10 Módulo de Pantalla LCD 16x4

La **pantalla LCD 16x4** fue integrada para proporcionar una interfaz local donde los usuarios pueden visualizar el estado del sistema (como la autenticación biométrica, la medición de resistencia y la fecha y hora de las mediciones).

Desarrollo del módulo:

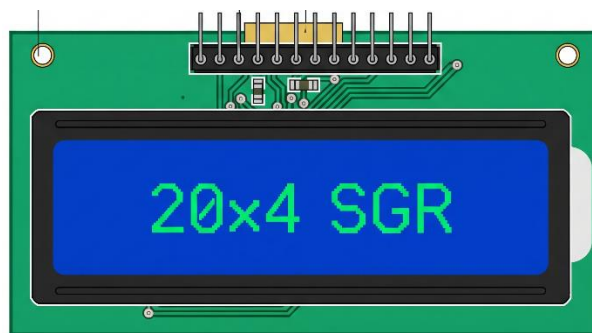
Interfaz de visualización: Utilizando la librería **LiquidCrystal** en **Arduino IDE**, se programó la pantalla LCD para mostrar datos relevantes, como el resultado de la autenticación de huellas y los valores de resistencia.

Interactividad: Se implementaron mensajes de estado, como "Acceso Permitido", "Acceso Denegado", y los valores actuales de resistencia de puesta a tierra.

Pruebas realizadas:

Pruebas de legibilidad: Se verificó que el texto en la pantalla fuera fácilmente legible en diferentes condiciones de luz.

Figura 36 LCD 20x4



Nota: Elaboración Propia

Pruebas de actualización de datos: Se aseguró que los datos mostrados en la pantalla se actualizarán correctamente durante las mediciones y el proceso de autenticación

4.2.11 Validación de la Conexión de los Módulos

Una vez completadas las etapas de diseño electrónico, ensamblado físico y programación inicial del sistema SGR, se lleva a cabo la fase de validación funcional de los módulos principales. Esta etapa es crítica para asegurar que todos los componentes se encuentren correctamente conectados, configurados y que respondan de manera adecuada a las instrucciones del microcontrolador ESP32.

Las pruebas se realizan de manera individual para cada módulo con el fin de aislar errores y garantizar un comportamiento estable e integrado. A continuación, se describen las validaciones realizadas:

4.2.11.1 1. Sensor Biométrico (AS608)

- **Objetivo de la prueba:** Verificar la comunicación entre el ESP32 y el sensor de huellas AS608 mediante UART.
- **Procedimiento:**
 - Se energiza el sistema y se inicia la rutina de enrolamiento desde la interfaz web.
 - Se coloca el dedo sobre el lector para capturar la huella.
 - Se valida si el sistema solicita una segunda captura y muestra un mensaje de **"Enrolamiento exitoso"**.
 - Se prueba también el reconocimiento durante una medición real.
- **Criterios de éxito:**
 - La huella es leída correctamente en ambas capturas durante el enrolamiento.
 - El sistema reconoce huellas previamente almacenadas de forma precisa.
 - El sensor responde sin latencias ni errores de comunicación.

4.2.11.2 2Módulo RTC (DS1307)

- **Objetivo de la prueba:** Validar que el reloj de tiempo real proporcione fecha y hora correctas al sistema.
- **Procedimiento:**
 - Se conecta el módulo al ESP32 vía protocolo I2C.
 - Se consulta la hora desde la interfaz web y se compara con la hora real.
 - Se realiza prueba de sincronización automática por NTP (si está habilitada) y prueba de ajuste manual desde la pestaña “Desarrollador”.
- **Criterios de éxito:**

- La hora y fecha mostradas son precisas y se mantienen activas incluso tras reinicios del sistema (gracias a la batería del RTC).
- La configuración desde la web actualiza correctamente el reloj interno.

4.2.11.3 Pantalla LCD (opcional, si aplica en tu diseño)

- **Objetivo de la prueba:** Verificar que la pantalla LCD (tipo I2C o SPI, según implementación) muestre correctamente los datos enviados por el ESP32.
- **Procedimiento:**
 - Se energiza el sistema y se visualiza en la pantalla la fecha, hora y/o estado actual del SGR.
 - Se provocan eventos (por ejemplo, una medición o un error) y se verifica la respuesta en pantalla.
- **Criterios de éxito:**
 - La información es legible y se actualiza en tiempo real.
 - No hay errores de comunicación o desincronización entre microcontrolador y pantalla.

4.2.11.4 Módulo Relé

- **Objetivo de la prueba:** Comprobar que el módulo relé responde a las señales digitales del ESP32 para controlar dispositivos externos (como indicadores, luces o sistemas de bloqueo).
- **Procedimiento:**
 - Se activa el relé desde el sistema ante una medición válida o inválida.
 - Se observa el funcionamiento físico del relé (clic de activación) y su efecto sobre el dispositivo conectado.
 - Se mide el voltaje en los pines del relé para confirmar conmutación.
- **Criterios de éxito:**
 - El relé se activa y desactiva según la lógica programada.
 - La conmutación es estable y no presenta rebotes eléctricos.
 - El relé soporta correctamente la carga conectada.

4.2.12 Interfaz de Usuario (Entorno Real)

La interfaz web del sistema **Staff Grounding Recorder (SGR)** fue diseñada con un enfoque en la usabilidad, la accesibilidad y la gestión centralizada de las funciones del sistema. Está compuesta por cinco pestañas principales, cada una orientada a una tarea específica dentro del proceso de monitoreo y control de la resistencia de puesta a tierra del personal. A continuación, se describe el propósito y funcionamiento de cada una de estas secciones.

4.2.12.1 Pestaña: Inicio

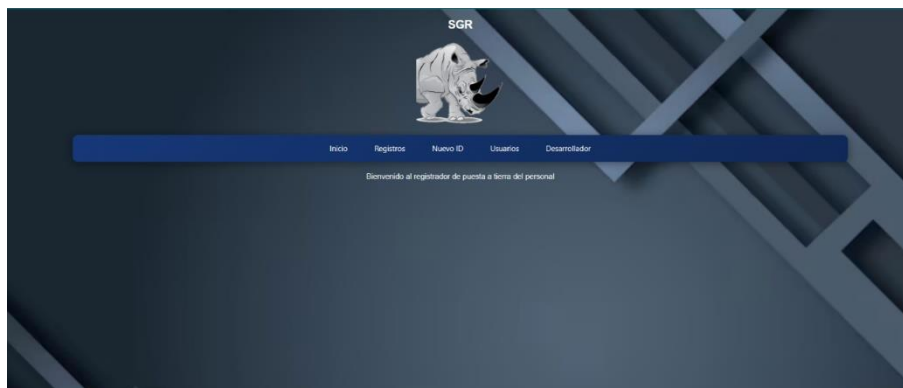
Actualmente, la pestaña **Inicio** no presenta contenido visible para el usuario, ya que se encuentra en una etapa de desarrollo. Sin embargo, su propósito dentro del sistema SGR está claramente definido. Esta sección está destinada a funcionar como un panel informativo central donde se mostrarán futuras *novedades, notificaciones importantes, alertas del sistema y mensajes de mantenimiento*.

Entre las funcionalidades previstas para esta pestaña se incluyen:

- Notificación de fallos en los módulos del sistema (lector biométrico, conexión con el ESP32, etc.).
- Mensajes de actualización de firmware o nuevas versiones del software.
- Estadísticas generales o resúmenes semanales del uso del sistema.
- Recordatorios de calibración o mantenimiento preventivo.
- Enlaces rápidos a las funciones más utilizadas o recientes.

El desarrollo de esta pestaña permitirá mejorar la experiencia del usuario y brindar información relevante de forma inmediata al acceder al sistema, posicionándola como una herramienta clave para la administración y supervisión general del SGR.

Figura 37 Pestaña Inicio



Nota: Elaboración Propia

4.2.12.2 Pestaña Registros

La pestaña **Registros** cumple la función de visualizar el historial completo de mediciones realizadas por el sistema SGR. Está diseñada para ofrecer una consulta clara, organizada y filtrable de todos los eventos registrados, permitiendo así una trazabilidad efectiva y el cumplimiento de los estándares de control en ambientes con riesgos ESD.

Esta sección cuenta con tres filtros principales que permiten acotar las búsquedas según los siguientes criterios:

- **Fecha de inicio:** permite seleccionar desde qué día se desea visualizar los registros.
- **Fecha de fin:** permite definir el último día del intervalo de búsqueda.
- **Nombre de usuario:** filtra los resultados según el nombre del empleado registrado.

“ Creación del SGR (Staff Grounding Recorder)”

En caso de no utilizar ninguno de estos filtros, el sistema muestra de forma predeterminada la totalidad de los registros almacenados en la base de datos, ordenados cronológicamente.

Figura 38 Pestaña Registros

ID	Nombre(s)	Apellido Paterno	Apellido Materno	Fecha	Hora	Medición MQ	Estado
7	Jorge Subador	Piayon	Piayon	03/07/2025	09:35:01	22.79	✓
6	Jorge Subador	Piayon	Piayon	03/07/2025	09:34:58	23.81	✓
5	Mario del Carmen	Piayon	Morales	03/07/2025	09:33:57	22.96	✓
4	Mario del Carmen	Piayon	Morales	03/07/2025	09:33:43	22.31	✓
3	Mario del Carmen	Piayon	Morales	03/07/2025	09:33:35	22.95	✓
2	Juan Jorge	Piayon	Zamora	03/07/2025	09:32:29	21.98	✓
1	Juan Jorge	Piayon	Zamora	03/07/2025	09:32:16	22.49	✓

Nota: Elaboración Propia

Cada fila del registro contiene la siguiente información:

- **ID de registro:** identificador único de cada medición almacenada.
- **Nombre del usuario**
- **Apellido paterno**
- **Apellido materno**
- **Fecha del registro**
- **Hora del registro**
- **Medición:** valor de resistencia de puesta a tierra, expresado en ohmios.
- **Resultado:** indica si la medición fue **aceptada** o **rechazada**, en función de los rangos establecidos por la normativa ANSI/ESD S20.20.

Esta pestaña permite además realizar un seguimiento individual del cumplimiento de las mediciones, facilitar auditorías internas, y exportar los datos a otros formatos para análisis externo. Su diseño está orientado a ser intuitivo y funcional para personal administrativo, de seguridad o de calidad.

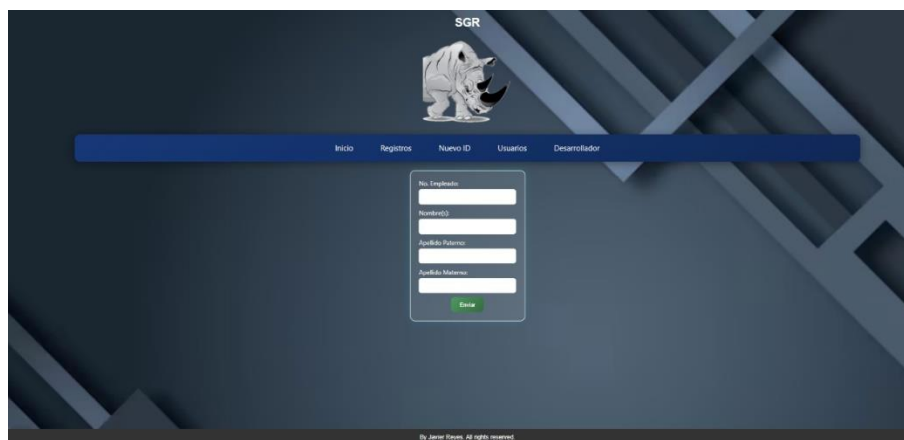
4.2.12.3 Pestaña: Alta de Usuario

La pestaña **Alta de Usuario** permite registrar nuevos empleados en el sistema SGR de forma segura y estructurada. Esta funcionalidad combina un formulario de ingreso de datos con el proceso de enrolamiento biométrico mediante el sensor de huellas digitales AS608, lo que garantiza la autenticación individual de cada usuario. El formulario de alta solicita los siguientes datos obligatorios:

- **Número de empleado**
- **Nombre o nombres**
- **Apellido paterno**
- **Apellido materno**

Una vez que los campos son completados correctamente y validados, el sistema activa automáticamente el sensor de huellas digitales para iniciar el proceso de enrolamiento biométrico. Este procedimiento consta de

Figura 39 Pestaña Nuevo Usuario



Nota: Elaboración Propia

dos pasos principales:

1. El sistema solicita al usuario colocar el dedo sobre el lector para capturar la primera imagen de huella.
2. A continuación, solicita retirarlo y volver a colocarlo para tomar una segunda imagen y confirmar la coincidencia.

Este doble escaneo permite asegurar la calidad del enrolamiento y evitar registros incorrectos o duplicados. Si ambas capturas coinciden dentro de los parámetros de seguridad definidos, el sistema muestra el mensaje **"Enrolamiento exitoso"** y automáticamente registra al usuario en la base de datos general.

4.2.12.4 Pestaña: Usuarios

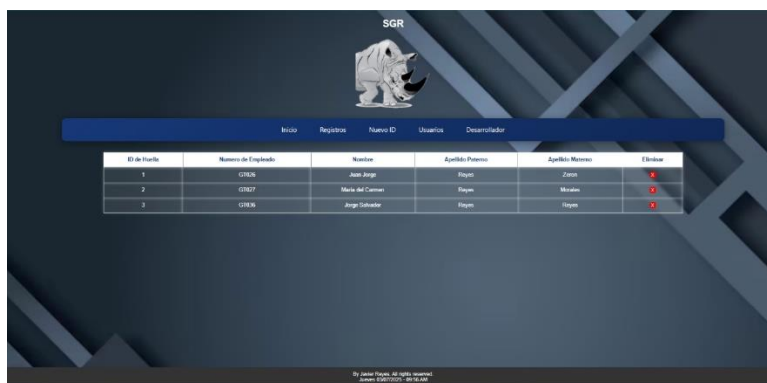
La pestaña **Usuarios** está destinada a mostrar la lista completa de empleados que han sido correctamente enrolados en el sistema SGR mediante el lector biométrico AS608. Su función principal es brindar una vista general de los usuarios registrados, facilitando el control, la revisión y la gestión del personal vinculado al sistema de medición de resistencia de puesta a tierra.

En esta sección se muestra la siguiente información para cada usuario registrado:

- **ID de huella:** número asignado automáticamente por el sensor AS608 al momento del enrolamiento, utilizado internamente para identificar la huella digital.
- **Nombre del usuario**
- **Apellido paterno**
- **Apellido materno**

Además, junto a cada registro se incluye una **opción de eliminación**, que permite remover al usuario del sistema si ya no pertenece a la organización o si se requiere volver a enrolarlo por algún motivo (por ejemplo, huella mal capturada o cambios administrativos). La funcionalidad de esta pestaña permite mantener una base de datos limpia, organizada y segura, asegurando que solo los usuarios válidos estén habilitados para interactuar con el sistema y realizar mediciones. También facilita auditorías internas y garantiza el control de acceso biométrico de manera efectiva.

Figura 40 Pestaña Usuarios



ID de Huella	Número de Empleado	Nombre	Apellido Paterno	Apellido Materno	Eliminar
1	123456	Juan Jorge	Rojas	Zamor	
2	123457	Marta del Carmen	Rojas	Morales	
3	123458	Jorge Sebastián	Rojas	Rojas	

Nota: Elaboración Propia

4.2.12.5 Pestaña: Desarrollador

La pestaña **Desarrollador** está orientada a tareas de configuración avanzada, mantenimiento y personalización del sistema SGR. Su acceso está pensado exclusivamente para personal técnico o administradores con permisos elevados, ya que las acciones disponibles en esta sección afectan directamente el funcionamiento interno y la integridad del sistema.

Esta pestaña agrupa múltiples opciones organizadas por funcionalidad, entre las que se incluyen:

4.2.12.6 1. Configuración del sensor biométrico

- **Nivel de seguridad del lector AS608:** permite modificar el nivel de sensibilidad de reconocimiento de huellas digitales, con un rango de 1 (menor seguridad, mayor tolerancia) a 5 (mayor seguridad, menor tolerancia).

4.2.12.7 2. Rango de medición del medidor de calzado

- Permite seleccionar el límite superior para las mediciones de resistencia de puesta a tierra, con opciones predeterminadas desde: **1 MΩ** hasta: **10 MΩ**, **35 MΩ**, **50 MΩ** y **100 MΩ**, de acuerdo con los distintos estándares o políticas internas de control ESD.

4.2.12.8 3. Gestión de bases de datos

- Desde esta pestaña se pueden eliminar por completo las siguientes bases de datos:
 - **Registros de mediciones**
 - **Usuarios enrolados**
- Esta función es útil para realizar reinicios de sistema, mantenimiento o limpieza de datos históricos, pero debe usarse con precaución, ya que implica la pérdida irreversible de información almacenada.

4.2.12.9 4. Personalización de la interfaz web

- **Colores:** se pueden actualizar los colores de la barra de navegación, botones y textos, permitiendo adaptar el diseño visual a los lineamientos corporativos o preferencias del usuario.
- **Logo y fondo:** es posible subir archivos personalizados (en formatos compatibles) para reemplazar el logotipo del sistema y el fondo (background) de la interfaz.

4.2.12.10 5. Actualizaciones y sincronización

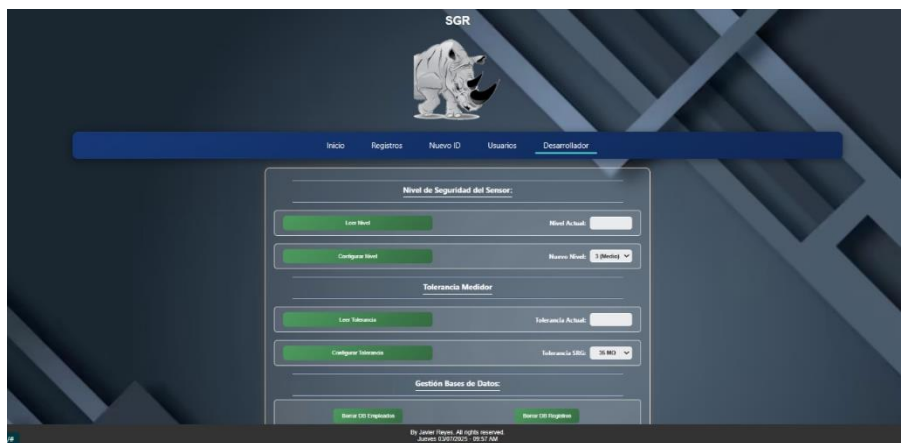
- **Actualización vía OTA (Over-The-Air):** permite cargar nuevas versiones del firmware del sistema sin necesidad de conexión física, facilitando mejoras y correcciones remotas.
- **Actualización del RTC (Reloj en Tiempo Real):**
 - **Automática:** sincronización a través de Internet (NTP).
 - **Manual:** configuración directa de fecha y hora desde la interfaz.

4.2.12.11 6. Reinicio del sistema

- Al final de esta sección se encuentra un **botón de reinicio del SGR**, el cual reinicia el microcontrolador ESP32 y restablece los servicios del sistema, útil para aplicar cambios críticos o solucionar errores de operación.

Esta pestaña convierte al sistema SGR en una solución altamente configurable y adaptable, con capacidades de mantenimiento remoto, control de parámetros críticos y personalización visual, lo que refuerza su potencial para integrarse en entornos industriales exigentes con requerimientos específicos.

Figura 41 Pestaña Desarrollador



Nota: Elaboración Propia

Fase 3: Evaluación y Retroalimentación (Agile)

Objetivo:

Obtener retroalimentación real de usuarios técnicos para verificar la eficacia de la medición de resistencia a tierra, la autenticación biométrica, y la interacción con la interfaz del sistema, antes de proceder al desarrollo integral.

En esta fase se aplicó un enfoque ágil centrado en la obtención de retroalimentación temprana y continua sobre el prototipo funcional del **Staff Grounding Recorder (SGR)**. La evaluación permitió identificar debilidades, validar funcionalidades clave y asegurar que el sistema respondiera adecuadamente a las necesidades del entorno industrial.

4.3.1 Actividades Realizadas

- **Pruebas de Usuario:** Se llevaron a cabo pruebas con personal técnico que simularon el uso real del sistema. Estas pruebas evaluaron el proceso de autenticación por huella dactilar, la medición de resistencia, la recepción de alertas y la visualización en la pantalla LCD.
- **Análisis de Datos Técnicos:** Se recolectaron y analizaron datos como el valor de las mediciones, tiempos de respuesta del sistema, errores de autenticación, y frecuencia de lecturas fuera de rango. Esto permitió evaluar la precisión del sistema de medición y la fiabilidad del sensor biométrico AS608.
- **Revisión de Retroalimentación:** La información proporcionada por los técnicos fue documentada y clasificada. Se identificaron mejoras clave, tales como:
 - Reorganización de mensajes en pantalla para mayor claridad.
 - Ajustes en la sensibilidad del umbral de resistencia.
 - Simplificación del proceso de enrolamiento biométrico.
- **Mejoras en el Comportamiento del Sensor Biométrico con la Interfaz Web:** Se optimizó la comunicación entre el sensor AS608 y la interfaz web, implementando protocolos de sincronización que permitieron una actualización en tiempo real de la autenticación biométrica, reduciendo latencias y errores de lectura. Además, se incorporaron notificaciones claras en la interfaz para informar sobre el estado del sensor, como desconexiones o fallos en la lectura, mejorando la experiencia de usuario y facilitando el diagnóstico rápido de fallos.
- **Mejoras en la Gestión de Redes y Configuración Web:** Se añadió la funcionalidad para seleccionar entre configuración DHCP y estática para la conexión Wi-Fi del ESP32, proporcionando mayor flexibilidad según el entorno de red industrial donde se despliegue el sistema. También se implementó la opción de resetear las variables de configuración Wi-Fi desde la interfaz web para facilitar la reconfiguración sin necesidad de acceso físico al dispositivo.
- **Implementación de Configuraciones Avanzadas de Seguridad del Sensor Biométrico:** Se integraron niveles configurables de seguridad para la autenticación biométrica, permitiendo establecer umbrales de confianza y bloqueos temporales ante intentos fallidos repetidos, reforzando la protección contra accesos no autorizados.
- **Mejoras en la Interfaz Web:** Se mejoró el diseño visual de la página web para hacerla más intuitiva y atractiva, incluyendo la personalización de colores, incorporación del logo institucional y la selección dinámica de fondos (background) según preferencias del usuario o ambiente. Estos cambios buscan facilitar la identificación y aceptación del sistema por parte del personal y administradores.

- **Actualización OTA (Over The Air):**
Se incorporó un sistema de actualización remota del firmware mediante la interfaz web, permitiendo cargar nuevas versiones sin necesidad de conexión física al ESP32. Esto facilita el mantenimiento y la implementación de futuras mejoras de manera segura y eficiente.
- **Sincronización y Actualización del RTC (Reloj de Tiempo Real):**
Se añadió la funcionalidad para actualizar fecha y hora del módulo RTC DS1307 desde la interfaz web, asegurando que los registros de medición y eventos biométricos cuenten con marcas temporales precisas y ajustables en cualquier momento.

4.3.2 Método Aplicado

Se implementó una dinámica iterativa propia del enfoque Agile, donde se realizaron pequeñas entregas funcionales seguidas de pruebas inmediatas y ajustes rápidos. Esta metodología permitió realizar mejoras incrementales al prototipo, facilitando una evolución continua basada en la experiencia de usuario y el desempeño observado, incorporando funcionalidades clave para robustecer el sistema y adaptarlo mejor a entornos reales industriales.

Fase 4: Desarrollo Integral y Refinamiento (Waterfall + Agile)

Objetivo: Tras la validación inicial, se procedió a una fase de desarrollo estructurado del sistema completo, donde se integraron de forma robusta todos los módulos de hardware y software. Esta etapa combinó el enfoque clásico de **Waterfall**, para asegurar cumplimiento técnico y normativo, con ciclos **Agile** para optimizar funcionalidades específicas.

Transformar el prototipo funcional en un sistema operativo completo, confiable y conforme con las especificaciones de la norma ANSI ESD 2020 y los principios de seguridad de datos personales.

4.4.1 Actividades Realizadas

- **Integración Total de Hardware y Software:** Se ensamblaron de forma definitiva todos los módulos del sistema: ESP32-S3, lector biométrico AS608, LCD 16x2, módulo RTC DS1307, relé de control, sistema de alimentación, y alarmas LED.
- **Optimización del Firmware:** Se refinaron los algoritmos de lectura y validación de resistencia, así como el procesamiento de huellas dactilares, optimizando el consumo energético y la velocidad de respuesta del sistema.
- **Desarrollo de Interfaz Web:** Se diseñó e implementó una interfaz basada en **HTML, CSS y JavaScript**, que permite consultar registros, visualizar alertas, y gestionar usuarios. La interfaz es ligera, accesible desde navegadores web locales y protegida mediante autenticación de administrador.
- **Implementación de Seguridad:** Se incorporaron medidas de protección de datos personales, incluyendo cifrado de registros biométricos y acceso restringido a funciones administrativas, cumpliendo con buenas prácticas de ciberseguridad.

4.4.1.1 Método Aplicado

Se utilizó una estrategia **Waterfall** para la planificación y ensamblaje integral del sistema, lo cual permitió definir claramente los entregables técnicos. Paralelamente, se aplicó **Agile** para ciclos de revisión y prueba de funcionalidades, logrando un equilibrio entre control estructurado y flexibilidad de desarrollo.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS PARA TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

La presente tesis tuvo como objetivo principal el diseño e implementación de un sistema automatizado, seguro y eficiente para la medición de resistencia de puesta a tierra del personal, en cumplimiento con la normativa **ANSI ESD 2020**. El resultado fue el desarrollo exitoso del **Staff Grounding Recorder (SGR)**, una solución tecnológica que combina hardware y software para ofrecer una herramienta confiable de monitoreo en entornos industriales donde las descargas electrostáticas (ESD) representan un riesgo operativo.

El sistema SGR incorpora tecnologías avanzadas como el microcontrolador **ESP32 S3**, el sensor biométrico **AS608**, una interfaz web, módulos de comunicación, una base de datos estructurada y elementos de alerta visual/auditiva. Este conjunto de componentes permite no solo realizar mediciones precisas de resistencia a tierra, sino también asociarlas de manera segura con usuarios autenticados mediante huella digital, manteniendo trazabilidad de los datos y cumplimiento normativo.

Entre los principales logros alcanzados destacan:

- **Medición automatizada y precisa** de la resistencia de puesta a tierra mediante un circuito ohmímetro integrado al ESP32.
- **Autenticación segura** de empleados mediante biometría dactilar, evitando suplantaciones y mejorando el control de acceso a mediciones.
- **Visualización de resultados en tiempo real**, utilizando una pantalla LCD, indicadores LED y una interfaz web intuitiva para el administrador.
- **Almacenamiento estructurado** de registros con fecha, hora, identidad del usuario y resultado, en una base de datos relacional con entidades claramente definidas.
- **Capacidad de gestión administrativa**, con control de usuarios, configuración de parámetros del sistema, y consulta de reportes a través de una plataforma digital.

Adicionalmente, se desarrollaron diagramas de flujo, casos de uso, clases y entidad-relación, los cuales permitieron estructurar el sistema desde una perspectiva lógica, funcional y de diseño. Esto contribuyó significativamente a la modularidad, escalabilidad y claridad del proyecto, facilitando su comprensión, mantenimiento y evolución.

5.2 Perspectivas para trabajos futuros

Si bien el sistema cumple con los objetivos establecidos y representa una solución funcional en entornos industriales, existen diversas oportunidades de mejora y expansión que pueden ser exploradas en futuras investigaciones y desarrollos:

1. **Optimización del circuito de medición:** Mejorar la precisión y estabilidad del sistema mediante técnicas de filtrado digital, compensación térmica y uso de componentes de mayor sensibilidad.
2. **Integración con sistemas industriales (Industria 4.0):** Conectar el SGR con protocolos como **Modbus, MQTT o OPC-UA**, permitiendo su integración en redes industriales, SCADA o sistemas ERP de mayor escala.
3. **Análisis predictivo y estadísticas avanzadas:** Implementar herramientas de análisis de datos, visualización gráfica y aprendizaje automático para prever fallas, identificar patrones de incumplimiento o establecer alertas tempranas.
4. **Aplicación móvil:** Desarrollar una aplicación para dispositivos móviles que permita al administrador consultar registros, recibir notificaciones y gestionar usuarios en tiempo real desde cualquier ubicación.
5. **Soporte para múltiples métodos de autenticación:** Añadir opciones como **tarjetas RFID, reconocimiento facial o PIN numérico**, ampliando las posibilidades de seguridad y adaptabilidad en distintos entornos.
6. **Certificación y validación externa:** Realizar procesos formales de validación bajo normas ISO (como **ISO 9001:2015**) para posicionar el sistema como un producto certificado y potencialmente comercializable.
7. **Diseño de hardware personalizado (PCB):** Sustituir el prototipo modular por una **placa de circuito impreso (PCB)** optimizada, reduciendo el tamaño, el consumo energético y mejorando la confiabilidad del sistema.
8. **Modo autónomo y portátil:** Incorporar batería de respaldo y comunicación vía Bluetooth o red móvil (4G/5G), para permitir la operación en zonas sin red local o sin alimentación constante.

Conclusión final

El desarrollo del **Staff Grounding Recorder (SGR)** marca un hito relevante no solo en el ámbito de la ingeniería electrónica aplicada a la seguridad industrial, sino también en la demostración del potencial tecnológico que puede surgir desde México hacia el mundo. Este sistema, que combina de forma precisa sensores de resistencia eléctrica, identificación biométrica y arquitectura embebida con conectividad inteligente, representa una respuesta local e innovadora a una necesidad global: la protección eficaz frente a descargas electrostáticas (ESD) en entornos industriales sensibles.

Desde un enfoque técnico, el SGR se sostiene sobre principios sólidos de normatividad internacional (como la ANSI/ESD S20.20), integrando buenas prácticas de medición, control de acceso y trazabilidad digital. Al emplear tecnologías accesibles como el ESP32 y sensores de huella como el AS608, se garantiza no solo confiabilidad y repetibilidad, sino también escalabilidad y viabilidad económica para su adopción en pequeñas y medianas industrias, algo especialmente importante en el contexto latinoamericano.

Sin embargo, el impacto de este proyecto va más allá de lo técnico. El hecho de que esta solución haya sido concebida, diseñada y desarrollada en el **Estado de México**, por talento formado en el **Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli**, es un testimonio del poder transformador de la educación pública y del compromiso de la ingeniería mexicana con la solución de problemas reales. Este trabajo demuestra que **la innovación no está reservada a centros de alto presupuesto**, sino que puede y debe surgir también desde nuestras instituciones locales con visión global.

Este proyecto busca inspirar a nuevas generaciones de ingenieros a confiar en su capacidad para crear tecnología útil, ética y de calidad. Porque cuando la ciencia y la técnica se ponen al servicio de la seguridad, la productividad y la dignidad del trabajo humano, estamos construyendo no solo mejores industrias, sino un **mejor país**.

Mi más profundo agradecimiento al **Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli**, por brindar el entorno académico y humano que hizo posible este desarrollo, y al **Estado de México**, por ser semillero de talento, esfuerzo y visión tecnológica.

REFERENCIAS

A-Data. (2019). *AS608 fingerprint sensor module - User manual*.

<https://www.adafruit.com/product/2347>

Adafruit Industries. (n.d.). *AS608 optical fingerprint sensor datasheet*.

<https://learn.adafruit.com/adafruit-optical-fingerprint-sensor>

Elmasri, R., & Navathe, S. B. (2015). *Fundamentals of database systems* (7ª ed.). Pearson Education.

Espressif Systems. (2020). *ESP32 technical reference manual* (v1.0).

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

Espressif Systems. (2021). *ESP32 technical reference manual*.

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

ESD Association. (2019). *ESD TR53-01-19: Compliance verification of ESD protective equipment and materials*.

ESD Association. (2021). *ANSI/ESD S20.20-2021: Protection of electrical and electronic parts, assemblies and equipment (exceeding 100 volts) from electrostatic discharges*. Electrostatic Discharge Association.

Gómez, J., & Cárdenas, L. (2021). Diseño de un sistema de monitoreo ESD para ambientes industriales sensitivos. *Revista Colombiana de Electrónica*, 12(1), 21–30.

<https://doi.org/10.22201/fie.25942146e.2021.12.1.304>

González, M., & Rodríguez, A. (2020). Diseño e implementación de un sistema de control de acceso biométrico utilizando ESP32 y sensores de huella digital. *Revista Electrónica de Ingeniería en Computación*, 18(2), 45–53.

International Electrotechnical Commission. (2016). *IEC 61340-5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements*.

Kumar, A., & Zhang, D. (2019). Biometric recognition: Trends, challenges and future directions. En *Biometric security* (pp. 1–18). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7799-0_1

Mejores prácticas para el control ESD – Static America. (2024, abril 10).

<https://www.staticamerica.com/2024/04/10/mejores-practicas-para-el-control-esd/>

Oliveras Sevilla, J. M. (2009). Prevención de riesgos industriales por descargas electrostáticas. *Técnica Industrial*, 283, 45–55.

SQLite Consortium. (n.d.). *SQLite documentation*. <https://www.sqlite.org/docs.html>

Texas Instruments. (2020). *Understanding ESD protection for electronic systems* [Application report]. <https://www.ti.com/lit/an/slla385a/slla385a.pdf>