



Universidad Internacional de La Rioja  
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología - ESIT

Máster Universitario en Industria 4.0

Aplicación de técnicas de Industria 4.0 en Sistemas de Prevención de Incendios.

Trabajo fin de estudio presentado por:	Llumiquinga Soria, Adrián F.
Tipo de trabajo:	Investigación
Director/a:	Peralta Martin-Palomino, Arturo
Fecha:	Abril 2022

## Resumen

Es indiscutible que los incendios siguen y seguirán estando presentes en el desarrollo del ser humano. Es responsabilidad de las diferentes áreas de la ingeniería el suministrar las herramientas necesarias para incrementar las posibilidades de sobrevivir de las personas. En este sentido, se analiza las tecnologías que actualmente se encuentran desarrolladas para automatizar algunos sistemas de prevención de incendios, utilizando la Inteligencia Artificial, Ciberseguridad, Big Data, Fabricación Aditiva e IoT.

En este TFM se propone el emplear las ventajas del IoT con una arquitectura con beacons o balizas que permita a las personas ser guiadas a las salidas de emergencia en caso de un evento de incendios u otro evento antrópico, y evacuar el edificio en el menor tiempo y de manera segura.

Para apuntalar la ventaja de utilizar dicha herramienta de evacuación, se simulan varios escenarios de los cuales se concluye que la evacuación asistida reduce significativamente el tiempo de salida del edificio, aumentando de esta manera, las probabilidades de las personas de sobrevivir.

**Palabras clave:** Prevención de Incendios, IoT, beacons, balizas, BLE.

## Abstract

It is indisputable that fires continue and will continue to be present in the development of the human being. It is the responsibility of the different areas of engineering to supply the necessary tools to improve people's chances of survival. In this sense, the technologies that are currently developed to automate some fire prevention systems are analyzed, using Artificial Intelligence, Cybersecurity, Big Data, Additive Manufacturing and IoT. In this document is proposed to use the advantages of the IoT with an architecture with beacons or beacons that allow people to be guided to the emergency exits in the event of a fire event or other anthropic event, and to evacuate the building in the least time and safely. To underpin the advantage of using this evacuation tool, several scenarios are simulated from which it is concluded that the assisted evacuation significantly reduces the time of leaving the building, thus increasing the chances of people surviving.

**Keywords:** Fire Prevention, IoT, beacons, BLE.

## Índice de contenidos

1. Introducción .....	11
1.1. Motivación .....	11
1.2. Planteamiento del trabajo .....	12
1.3. Estructura de capítulos .....	16
2. Contexto y estado del arte .....	18
2.1. Descripción general del contexto del proyecto .....	18
2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFE .....	19
2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFE .....	21
2.3.1. Inteligencia artificial .....	21
2.3.2. Sensores inteligentes .....	23
2.3.3. Cloud computing .....	26
2.3.4. Blockchain .....	27
2.4. Análisis de incendios en diferentes tipos de ocupaciones .....	28
2.4.1. Catástrofe en el Supermercado Ycuá Bolaños .....	29
2.4.2. Incendio de la Discoteca Kiss .....	32
2.4.3. Incendio de Mesa Redonda .....	34
2.4.4. Incendio en Cárcel Estatal Comayagua .....	36
2.5. Normativa de prevención de incendios relacionada a Industria 4.0 .....	39
2.5.1. Ciberseguridad .....	39
2.5.2. Data Centers .....	41
2.5.3. Fabricación Aditiva .....	42
2.6. Sistemas de prevención de incendios 4.0 .....	46
2.6.1. Realidad Virtual y Realidad Aumentada .....	46
2.6.2. Análisis de datos de incendios .....	47

2.6.3. Big Data e incendios forestales .....	50
2.6.4. Fabricación aditiva en prevención de incendios .....	52
2.7. Comparación entre sistemas de prevención de incendios tradicional y el sistema de prevención que emplea tecnologías de Industria 4.0 .....	54
2.7.1. Entrenamiento de bomberos .....	54
2.7.2. Análisis de datos de incendios.....	56
2.7.3. Fabricación Aditiva .....	57
2.8. Conclusiones sobre el estado del arte .....	59
3. Descripción general de la contribución del TFE .....	60
3.1. Objetivos .....	60
3.2. Metodología del trabajo .....	60
3.3. Descripción general de las partes o componentes de la propuesta .....	60
4. Desarrollo específico de la contribución.....	64
4.1. Mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligentes.....	64
4.2. Variables a monitorizar en los mapas de riesgos, recursos y evacuación .....	65
4.3. Arquitectura de los mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligentes .....	66
4.3.1. Punto de vista del negocio .....	66
4.3.2. Punto de vista del uso .....	67
4.3.3. Punto de vista funcional .....	68
4.3.4. Punto de vista implementación.....	70
4.4. Propuesta de implementación de MRREI.....	71
4.4.1. Tipo de comunicación.....	75
4.4.2. Sensores.....	77
4.4.3. Firmware de los beacons.....	79
4.4.4. Infraestructura en la nube.....	79

4.4.5. Beacon mobile SDK.....	80
4.4.6. Protocolos de los beacons.....	80
4.4.7. Hardware.....	84
4.4.8. Seguridad de los beacons.....	85
4.4.9. Cantidad de Beacons.....	86
4.4.10. Criterios para instalar Beacons.....	88
4.4.11. Recomendaciones para adquirir Beacons.....	90
4.4.12. Distribución de beacons en el techo del edificio.....	92
4.4.13. Enfoque de la propuesta.....	93
4.4.14. Simulación de evacuación.....	97
4.4.15. Presupuesto para implementación.....	99
5. Conclusiones y trabajos futuros.....	101
5.1. Conclusiones.....	101
5.2. Trabajos Futuros.....	102
Referencias bibliográficas.....	104
Anexo A. Especificaciones de beacons .....	110
Anexo B. Resultados de la simulación en Pathfinder.....	113
Anexo C. Algoritmo A*.....	117

## Índice de figuras

<i>Figura 1. Incendio en discoteca Kiss - Brasil.</i> .....	11
<i>Figura 2. Evolución de la protección contra incendios.</i> .....	19
<i>Figura 3. Llamas reales e imagen de llamas con visión artificial.</i> .....	22
<i>Figura 4. Crecimiento de la utilización de alarmas de humo en hogares en Estados Unidos: 1977-2010.</i> .....	24
<i>Figura 5. Incendios estructurales en casas reportados entre: 1980-2019.</i> .....	24
<i>Figura 6. Elementos de un sistema de seguridad de F&amp;G en industria 4.0</i> .....	25
<i>Figura 7. Flujo de minería de reglas de asociación basada en TDP.</i> .....	26
<i>Figura 8. Flujo del sistema.</i> .....	28
<i>Figura 9. Plano de implantación del edificio.</i> .....	30
<i>Figura 10. Plano de implantación de la discoteca.</i> .....	32
<i>Figura 11. Esquema del área afectada por el incendio.</i> .....	35
<i>Figura 12. Incendio en cárcel de Comayagua.</i> .....	38
<i>Figura 13. Funcionamiento típico de un sistema Firewall/Gateway.</i> .....	41
<i>Figura 14. Sistemas de prevención de incendios en data centers.</i> .....	42
<i>Figura 15. Pared fabricada con impresión 3D.</i> .....	45
<i>Figura 16. Módulo de entrenamiento creado por FLAIM Systems.</i> .....	47
<i>Figura 17. Fire Cast 3.0: Modelo de Machine Learning</i> .....	50
<i>Figura 18. Propuesta de arquitectura de Big Data para la administración de incendios forestales.</i> .....	51
<i>Figura 19. Plataforma de dirección para big data forestal.</i> .....	52
<i>Figura 20. Triángulo del fuego.</i> .....	52
<i>Figura 21. Micrografía electrónica de barido de impresión 3D de polímero.</i> .....	53
<i>Figura 22. Herramientas de entrenamiento de realidad virtual.</i> .....	55

<i>Figura 23. Enseñanza de prevención de incendios .....</i>	56
<i>Figura 24. Inspección de incendios .....</i>	56
<i>Figura 25. Primera casa levantada en España con impresión 3D. ....</i>	58
<i>Figura 26. Arquitectura e integración de tecnologías. ....</i>	62
<i>Figura 27. Capa de vista de uso .....</i>	68
<i>Figura 28. Dominios funcionales. ....</i>	69
<i>Figura 29. Arquitectura de bus de datos. ....</i>	71
<i>Figura 30. Mapa de riesgos, recursos y evacuación instalado en cartelera. ....</i>	72
<i>Figura 31. Plano de implantación de propuesta.....</i>	73
<i>Figura 32. Localización multisensorial de la empresa Telefónica. ....</i>	76
<i>Figura 33. Dispositivo con comunicación BLE. ....</i>	77
<i>Figura 34. Sensores de dispositivo inteligente.....</i>	78
<i>Figura 35. Tamaño de beacon .....</i>	78
<i>Figura 36. Puerta de enlace para beacons. ....</i>	79
<i>Figura 37. Aplicación celular para beacons. ....</i>	80
<i>Figura 38. Ejemplo de iBeacons. ....</i>	81
<i>Figura 39. Formato de protocolo de baliza Eddystone de Google. ....</i>	82
<i>Figura 40. Módulos de baliza BLE. ....</i>	84
<i>Figura 41. BLE beacon .....</i>	85
<i>Figura 42. Partes de un BLE beacon .....</i>	85
<i>Figura 43. Modelo de autentificación OAuth 2.0 .....</i>	86
<i>Figura 44. Planos de una edificación típica con varios niveles y ambientes. ....</i>	86
<i>Figura 45. Distribución en forma de malla de BLE beacon .....</i>	88
<i>Figura 46. Utilización óptima de los canales para el uso simultáneo de BLE y Wi-Fi. ....</i>	89
<i>Figura 47. Esquema de tres balizas para la trilateración. ....</i>	89

<i>Figura 48. Plano de cobertura de beacons en el techo del área comercial.</i> .....	92
<i>Figura 49. Plano de distribución de beacons.</i> .....	93
<i>Figura 50. Diagrama de uso de aplicación.</i> .....	95
<i>Figura 51. Propuesta de arquitectura de App EvaacuaMe.</i> .....	96
<i>Figura 52. Proceso de configuración de la imagen del mapa de cada piso.</i> .....	97
<i>Figura 53. Simulación de egreso de personas con el software Pathfinder.</i> .....	98

## Índice de tablas

Tabla 1. <i>Incendios a nivel mundial con mayor número de muertos en el año 2021.</i> .....	12
Tabla 2. <i>Diagrama de Gantt de las actividades planificadas.</i> .....	63
Tabla 3. <i>Tipos de mapas en un plan de emergencia.</i> .....	65
Tabla 4. <i>Tareas y roles desde el punto de vista de uso.</i> .....	67
Tabla 5. <i>Cuadro comparativo entre BLE beacons y otras tecnologías.</i> .....	74
Tabla 6. <i>Cuadro comparativo entre BLE y Bluetooth clásico.</i> .....	74
Tabla 7. <i>Ventajas y desventajas de las beacons.</i> .....	75
Tabla 8. <i>Cuadro comparativo entre tecnologías beacons.</i> .....	83
Tabla 9. <i>Cantidad de beacons aproximada por tipo de ocupación.</i> .....	87
Tabla 10. <i>Atenuación de la señal del Bluetooth.</i> .....	87
Tabla 11. <i>Resultados de la evacuación simulada.</i> .....	99
Tabla 12. <i>Presupuesto de la propuesta de implementación.</i> .....	100

## 1. Introducción

Las técnicas que se utilizan en la Industria 4.0 han alcanzado a la industria automotriz, metalúrgica, procesamiento de alimentos, etc. por lo que es de esperar que también llegue a involucrarse en algunos tipos de sistemas que son transversales a la mayoría de industrias como son los sistemas de prevención de incendios.

La Industria 4.0 posee tecnologías que pueden ser aprovechadas en los sistemas de prevención de incendio y que actualmente se pueden ver en varias aplicaciones de extinción y detección temprana de incendios, así como en actividades técnicas de los cuerpos de bomberos como son: inspeccionar, probar y garantizar el buen trabajo de los diversos sistemas de protección contra incendios: señalización y detección, extinción con agua o agentes químicos, ventilación y sistemas de protección pasivos de construcción.

### 1.1. Motivación

Los sistemas de prevención de incendios tienen una finalidad primordial que es la de salvar vidas. El salvar vidas se puede realizar de dos maneras: anunciando de manera temprana la presencia de un incendio en las ocupaciones de tal manera que las personas puedan evacuar de manera segura y a tiempo, o extinguiendo el incendio con los propios medios instalados en la edificación o por la intervención de personal especializado en combate de incendios (cuerpos de bomberos).

**Figura 1.** Incendio en discoteca Kiss - Brasil.



Fuente: Revista NFPAJLA, 2013.

Lo anterior se enmarca dentro de los criterios admisibles de protección y el cumplimiento de los objetivos para analizar la protección contra incendios que abarca las siguientes cinco áreas:

- Protección de la vida
- Protección de los bienes
- Permitir la continuación de las operaciones
- Asegurar la conservación del patrimonio histórico
- La protección ambiental.

En este contexto se plantea que el emplear las tecnologías de Industria 4.0 puede impulsar un cambio en el diseño, instalación, pruebas e inspección de los sistemas de prevención de incendios con el objetivo de incrementar las posibilidades de que las personas sobrevivan a un incendio, así mismo, se reduzcan los costos por pérdidas materiales en estos eventos.

## 1.2. Planteamiento del trabajo

Al revisar de manera general los incendios a nivel mundial, se llega a la conclusión de que estos pueden ocurrir en cualquier tipo de ocupación, desde cárceles estatales hasta en bosques de miles de hectáreas. Es decir, para que ocurra un incendio no es un limitante el lugar donde se origina, sino las medidas de prevención que se hayan implementado para reducir el máximo posible, el número de víctimas y las pérdidas materiales.

En la siguiente tabla se resumen los incendios ocurridos a nivel mundial con el mayor número de víctimas en el año 2021. En total son 616 víctimas de estos incendios.

**Tabla 1. Incendios a nivel mundial con mayor número de muertos en el año 2021.**

Establecimiento	Lugar	Fecha	Víctimas
Camión cisterna	Freetown – Sierra Leona	Noviembre de 2021	99
Hospital	Nasiriya - Irak	Julio de 2021	92
Hospital *	Bagdag - Irak	Abril de 2021	82
Incendio forestal	Argelia	Agosto de 2021	65
Fábrica de alimentos	Daca - Bangladesh	Julio de 2021	53
Mina de carbón	Siberia - Rusia	Noviembre de 2021	52
Edificio residencial	Kaohsiung - Taiwan	Octubre de 2021	46
Autobús turistas	Bosnek - Bulgaria	Noviembre de 2021	45
Cárcel Estatal	Yakarta - Indonesia	Septiembre de 2021	42
Cárcel Estatal	Gitega - Burundi	Diciembre de 2021	39

\* Algunas víctimas resultaron de la desconexión de los respiradores de oxígeno.

Fuente: Observatorio de prevención de riesgos y accidentes, 2022

Al hacer un recuento de los peores incendios ocurridos a nivel mundial, se tiene que desde el año 2000 se han presentado incendios en diversos tipos de ocupaciones. El número de víctimas por estos incendios no han podido ser superadas en los últimos años, lo que indica que las medidas adoptadas por algunos gobiernos en los últimos años están dando resultados.

**Tabla 2. Incendios a nivel mundial con mayor número de muertos desde el año 2000.**

Establecimiento	Lugar	Fecha	Víctimas
Iglesia*	Kanungo – Uganda	Marzo de 2000	530
Supermercado	Asunción - Paraguay	Agosto de 2004	426
Centro comercial	Louyang - China	Diciembre de 2000	309
Cárcel Estatal	Comayagua – Honduras	Febrero de 2012	361
Ventas callejeras	Lima - Perú	Diciembre de 2001	291
Fábrica de ropa	Karanchi - Pakistán	Febrero de 2015	258
Discoteca	Rio Grande do Soul - Brasil	Enero de 2013	245
Metro	Taegu – Corea del Sur	Febrero de 2003	198
Discoteca	Bueno Aires - Argentina	Diciembre de 2004	191
Ferrocarril de montaña	Kaprun – Austria	Noviembre de 2000	155
Cárcel del estado	Higuey – Rep. Dominicana	Marzo de 2005	134
Fábrica pollos	Mishazi – China	Junio de 2013	119
Cárcel del estado	San Pedro Sula – Honduras	Mayo de 2004	104

\*Incendio premeditado.

Fuente: BBC News, 2022.

Lastimosamente, se observa en el cuadro anterior una tendencia marcada en Latinoamérica al convertirse en la región del planeta donde existe mayor probabilidad de que se genere una gran cantidad de pérdidas humanas debido a un gran incendio. Los avances en tecnología de materiales permiten encontrar soluciones arquitectónicas novedosas, con sistemas de confort cada vez más integrados en su funcionamiento, sin embargo, *“Los terribles incendios ocurridos recientemente en Asunción, Buenos Aires, Caracas. Higüey, Lima y San Pedro Sula demuestran que nuestro mayor problema está centrado en las edificaciones grandes, ya sean ocupaciones sanitarias, mercantiles, penitenciarias, de reunión pública, edificios de gran altura o industria. Si es en este tipo de edificaciones donde más estamos copiando del primer mundo, ¿será que sólo estamos copiando lo que se ve y se nos olvida diseñar e instalar lo que no se ve?”* (Moncada, 2005).

La pregunta que se va a dar respuesta con esta investigación es: ¿Se pueden aplicar las técnicas de Industria 4.0 en los sistemas de prevención de incendios?

Para responder esta pregunta, se propone realizar la recopilación de casos de estudio de incendios reales con gran cantidad de víctimas en el ámbito local, regional y mundial. Se realizará la investigación de la tecnología desarrollada por diferentes compañías dedicadas a la protección contra incendios y se establecerán los avances de la normativa internacional que se va actualizando, más rápidamente que la normativa local, a los cambios tecnológicos.

Esto incluye describir los beneficios que se pueden obtener si se aplican tecnologías de Industria 4.0, respecto a las soluciones convencionales reales que se aplicaron en cada caso de estudio.

*“Mientras más avanza la tecnología, mayor integrada se vuelve”* (Mahoney, 2021), es decir, los múltiples sistemas que se encuentran dentro de una organización o edificio, se encuentran integrados por una intranet o por el internet. Un ejemplo es el sistema de alarmas de incendios y señalización que pueden estar integrados con muchos otros sistemas y expuestos al mismo tipo de ciber amenazas de las computadoras y redes. Por este motivo, en la edición del año 2022, la NFPA 72 -Código Nacional de Alarmas de Incendio y señalización- incluye en el capítulo 11 los requisitos de ciberseguridad para los equipos, software, seguridad física y acceso a los equipos empleados en los sistemas de alarmas de incendios.

Los titulares de incendios a nivel local, regional y mundial son comunes en estos días. Los incendios en hoteles, hospitales, fábricas, salas de cine, etc., se han vuelto comunes y, la pérdida de vidas humanas y bienes, han servido para aprender algo nuevo a aplicar en la prevención de incendios y han contribuido a mejorar la normativa. *“Los datos de incendio globales, sincronizados con los datos masivos, pueden ofrecernos una comprensión más clara sobre cómo las tendencias demográficas, los cambios económicos, la capacidad operativa del departamento de bomberos, y el comportamiento humano impactarán en las muertes por incendio, lesiones, pérdidas de propiedad y en la resiliencia de las comunidades.”* (Bliss, 2016). Esto finalmente, es muy importante debido a que el empleo y procesamiento de la gran cantidad de datos generará una guía aprovechable y que sea de fácil implementación en las estrategias de las entidades de control para salvar vidas en los incendios.

El big data también puede emplearse en el combate de incendios al analizar los datos de los bomberos en tiempo real, por ejemplo, al emplear un dispositivo biométrico “wearable” para poder determinar cuando una persona requiere ser retirada de la escena del incendio porque se encuentra deshidratada o asustada.

Las inspecciones de los sistemas de prevención de incendios también han cambiado con el paso del tiempo. Debido a la pandemia y la dificultad de movilización y acceso a las ocupaciones por las medidas de seguridad, ha planteado la posibilidad de realizar inspecciones de sistemas de bombeo de agua, de extintores, de sistemas de alarmas de incendios, etc. de manera remota, es decir, sin la presencia física del inspector. Frente a este escenario, la NFPA ha tenido que desarrollar en un corto plazo, la normativa que establezca los lineamientos para la inspección remota (IR), se trata de la NFPA 915 -Norma para Inspecciones Remotas-. Según lo probado en sitio, con la inspección realizada remotamente se pueden lograr resultados iguales o superiores que una inspección realizada presencialmente.

En el ámbito de la tecnología de detección de incendios, los detectores de humo, de calor o detectores de la concentración de productos de la combustión están empleando la tecnología inalámbrica y el internet de las cosas IoT para notificar la presencia o no de un incendio.

Sin embargo, el empleo de las técnicas de industria 4.0 también se están desarrollando y ayudando a los departamentos de bomberos a realizar su trabajo. Por ejemplo, se están empleando drones que llevan potentes cámaras termográficas que ayudan a los encargados del combate de incendios a tomar mejores decisiones para utilizar sus limitados recursos en incendios estructurales masivos de bodegas o en incendios forestales. Los drones también se están empezando a utilizar para transportar agentes extintores, espuma o polvo químico, en incendios en ocupaciones altas (gran altura).

En la supresión de incendios, la norma NFPA 13-2022, Norma para la Instalación de Sistemas de Rociadores, menciona por vez primera a los rociadores activados por señal electrónica. En la actualidad, se están diseñando rociadores para proteger los almacenamientos considerados de riesgo alto de incendio que incluyen materiales como plásticos expandidos. En estos rociadores, los detectores de calor están enlazados con el actuador que permite el paso del agua al rociador además de sensar constantemente la temperatura del aire. Al momento de ocurrir un incendio, el sistema recibe la señal del detector de calor y permitirá el paso de agua a los rociadores, de tal manera que el agua genere un patrón de descarga de agua sobre las llamas de acuerdo a los algoritmos que se programan en el panel de control. La tecnología de simulación de fluidos, de IIoT y fabricación aditiva permitirá que solo se activen los rociadores que son necesarios para apagar el fuego, de esta manera se restringirá el daño producido por las llamas y el agua que se descarga.

Finalmente, se incluirán aspectos de seguridad actualizados para las industrias que están empleando las técnicas de Industria 4.0. Por ejemplo, en la última actualización de NFPA 1 Código de Incendios, en el capítulo 46 se ha incorporado las recomendaciones de protección contra incendios en lugares que albergan operaciones de fabricación aditiva. (Longley, 2021). El Código de Incendios divide los requisitos para el peligro asociado con: Fabricación Aditiva Industrial y Fabricación Aditiva No Industrial. Para la fabricación donde se emplean polvos de impresión los materiales deben estar sometidas a pruebas de combustibilidad de conformidad con la NFPA 484, Norma para Metales Combustibles o NFPA 652, Norma sobre los Fundamentos del Polvo Combustible.

Por lo tanto, la importancia de conocer las ventajas de emplear tecnologías de Industria 4.0 es importante para poder comparar y aprovechar las ventajas que ofrece el aplicar dichas tecnologías en el fin único de la prevención de incendios que es el salvar vidas.

### 1.3. Estructura de capítulos

En este trabajo de fin de master se ha considerado el estructurar en varios capítulos que se explican a continuación:

El capítulo No. 02: Contexto y Estado del Arte, se indica el entorno general que rodea la propuesta del presente trabajo. Se incluye la descripción del estado del arte de las diferentes técnicas involucradas en la Industria 4.0 que se pueden emplear en sistemas de prevención contra incendios como son: Big data para explorar los patrones en los datos, ciberseguridad para generar un ambiente ciberfísico seguro, procesos de fabricación inteligentes, fabricación aditiva, simulación de flujos (humos, gases, agua de cobertura) y robótica en el ámbito de combate de incendios. Se expondrán trabajos de investigación y normativa relacionada a las tecnologías de Industria 4.0 y los sistemas de prevención de incendios. Se analiza las ventajas de emplear las tecnologías de Industria 4.0 en los sistemas de prevención de incendios: notificadores de alarmas, de supresión de incendios, de protección pasiva. También se realiza la comparación entre un sistema de prevención de incendios tradicional y un sistema de prevención de incendios con tecnologías de industria 4.0.

Posteriormente, en el capítulo No. 03 Descripción general de la contribución del TFM, se presentan los objetivos generales y específicos que se pretenden conseguir con el TFM. Además, se incluye la metodología utilizada para conseguir los objetivos planteados.

En el capítulo 4. Desarrollo Específico de la Contribución del TFM se propone la implementación de una aplicación que ayude a las personas a guiarse hacia las salidas de emergencia. Se propone su arquitectura, sus componentes y, finalmente, se realiza la simulación de su implementación con un software de evacuación. Se presenta un análisis de costos entre ambos tipos de sistemas. Se revisará la normativa local basada en la NFPA para que la propuesta cumpla con la normativa vigente en materia de prevención de incendios.

A continuación, en el capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros se indican las conclusiones obtenidas en el desarrollo del TFM y su relación con los objetivos planteados. Se deja propuesta la posibilidad de realizar trabajos futuros utilizando sistemas ciberfísicos.

Finalmente, mientras que en el capítulo 6. Referencias se citan todas las fuentes que contribuyeron al desarrollo del presente TFM, en el capítulo de Anexos se adjunta la hoja técnica de alguno de los componentes de la propuesta y los resultados de la simulación de evacuación en 3 escenarios distintos.

## 2. Contexto y estado del arte

### 2.1. Descripción general del contexto del proyecto

La prevención de incendios es una tarea muy importante para la defensa de la vida, de los bienes materiales, la continuidad del negocio, cuidado del patrimonio y para evitar la contaminación ambiental. Cada año se produce incendios y explosiones que provocan pérdidas humanas y materiales. De acuerdo al análisis realizado según los reportes de 27 a 57 países, entre 1993 y 2019 hubo entre 2.5 a 4.5 millones de incendios y de 17 a 62 miles de muertes causadas por los incendios dependiendo del año (Nikolai Brushninsky et al, 2022), y en total 19.187 muertes y 68.217 personas heridas causadas por el fuego en 34 países. Analizando donde se producen los incendios se encuentra que estos pueden ocurrir en: incendios estructurales 31.6%, incendios en vehículos 13.4%, incendios forestales 1.8%, incendios de hierba y arbustos 20%, incendios de basura 14.00% y en otros el 19.2%. Los incendios forestales causan anualmente entre 100 a 400 muertes en personas y han afectado a aproximadamente a 67 millones de hectáreas cada año entre el 2003 y 2012. (FAO y PNUMA, 2020).

En el continente europeo se tienen en promedio por día 5.000 incendios, fallecen 11 personas y 190 heridos por el fuego. Estos incendios impactan negativamente en la economía, el valor del costo económico de todos los incendios asciende al 1% del producto interno bruto. (Firesafeeurope, 2022)

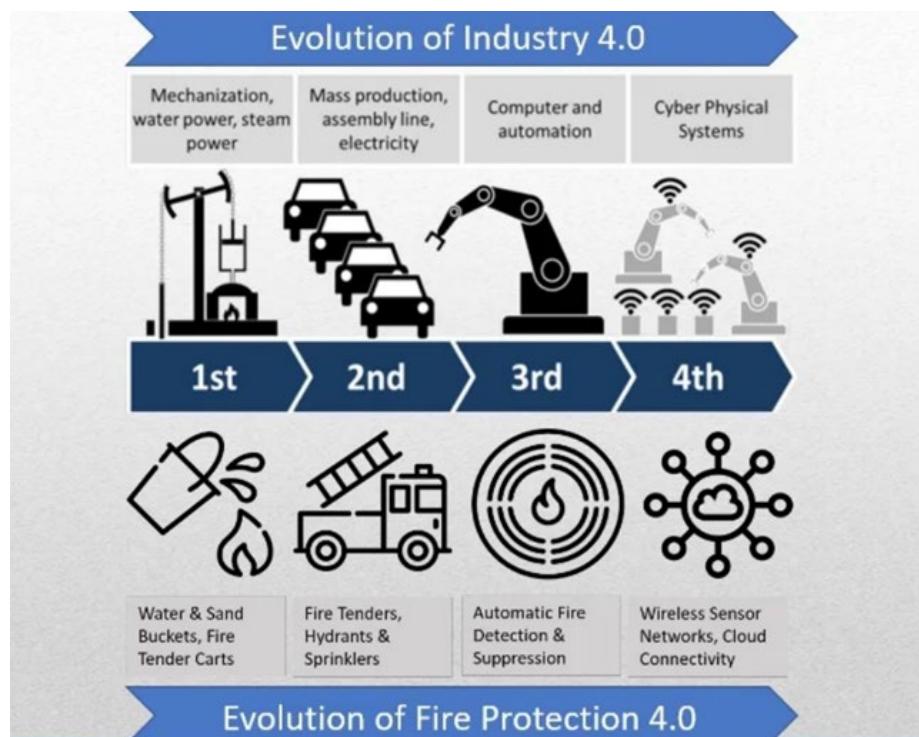
De acuerdo con la National Fire Protection Association, en el año 2020 los departamentos de bomberos de Estados Unidos, respondió a un incendio cada 23 segundos llegando a un total de 1'388.500 incendios. Estos incendios se distribuyeron en: incendios estructurales 35%, incendios en vehículos 15%, otros incendios 50%, ocasionando un total de 21.866 millones de dólares en pérdidas materiales, 3.500 pérdidas humanas y 15.200 personas heridas por el fuego. A pesar de estas cifras, en comparación con la cantidad de incendios y sus consecuencias desde el año 1980, se encuentra una disminución sustancial mayor al 50%. Esto como consecuencia del rigor normativo que la autoridad competente tiene en edificaciones nuevas y existentes. (Ahrens, M., y Evarts, B.,2021).

En mi país, Ecuador, no existe una entidad que recoja las estadísticas de incendios a nivel general. Cada cuerpo de bomberos de los 221 cantones de la República del Ecuador posee un

cuerpo de bomberos para atender los incendios locales. Sin embargo, se toma como referente las estadísticas de una las ciudades más grandes, la ciudad de Guayaquil, en la que a lo largo del año 2020 se atendieron 2.997 incendios, de los cuales el 36.60% corresponde a maleza prendida, el 29.46% a basura prendida, el 13.18% a principio de incendios y el 20.76% de otros tipos. Al ser la primera ciudad económica del país, en la ciudad de Guayaquil se halla el principal puerto del país y muchas industrias. Los incendios en industrias han causado cientos de miles de dólares en pérdidas materiales. (Bomberos Guayaquil, 2020)

Para hacer frente a los incendios estructurales y forestales, los gobiernos locales han invertido gran cantidad de recursos en capacitación, compra de equipos, adquisición de vehículos, etc. En países desarrollados, se está investigando e implementando las tecnologías de prevención de incendios basados en Industria 4.0.

**Figura 2.** Evolución de la protección contra incendios.



Fuente: Fire Protection 4.0, 2017.

## 2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFE

Al realizar la investigación de proyectos relacionados con las tecnologías de industria 4.0 se tiene que por parte de la National Fire Protection Association NFPA, existen iniciativas recientes relacionadas con este tipo de tecnologías. Un ejemplo es Zabaan que es "un

*prototipo de servicio de traducción automática desarrollado por científicos de datos en la división global de NFPA en colaboración con el programa WPI GQP. El sistema tiene como objetivo utilizar un enfoque híbrido de traducción automática neuronal (NMT) y técnicas human-in-the-loop (HITL) para sugerir traducciones específicas de dominio de contenido técnico para ayudar a los traductores humanos. Los modelos de traducción actuales se construyen utilizando conjuntos de datos de contenido de NFPA como Código y Normas, Investigación Aplicada y material de Educación Pública y Divulgación y se enfocan en traducciones bidireccionales inglés-español. La interfaz de usuario tiene opciones para obtener traducciones instantáneas y editar las incorrectas sugeridas por la máquina NMT.” (NFPA Data Lab, 2022).*

*Otra herramienta desarrollada es LocationTools que fue “diseñada para ejecutarse en una sola estación de trabajo o en un clúster de Cloudera, esta plataforma permite la geocodificación bidireccional rápida de conjuntos de datos de texto libre extremadamente grandes de información de direcciones de calles utilizando información disponible públicamente. LocationTools proporciona una API fácil de usar, múltiples opciones de implementación basadas en Docker y documentación completa de nuestra solución innovadora para el problema de geolocalización masiva mediante una combinación de procesamiento de lenguaje natural, indexación y búsqueda de texto eficientes y computación distribuida habilitada para Hadoop.” (NFPA Data Lab, 2022)*

También se ha desarrollado un Contador de multitudes (OCC) que es una plataforma prototipo que utiliza técnicas de aprendizaje profundo para estimar y rastrear el tamaño de las multitudes a partir de imágenes de video y comparar los resultados con los aforos permitidos de acuerdo al tipo de ocupación según se puede encontrar en la NFPA 101-Código de Seguridad Humana. El contador de multitudes OCC incorpora múltiples arquitecturas de redes neuronales y un front-end web fácil de implementar para monitorear visualmente los resultados casi en tiempo real. (NFPA Data Lab, 2022)

Finalmente, otro proyecto es la Priorización de inspección de propiedades (PIP) que tiene como objetivo el priorizar las inspecciones de ocupaciones (edificaciones) mediante la combinación del análisis y evaluación de varios factores de riesgo con un modelo de ciencia de datos mediante la experiencia de más de 100 AHJ (Authority Having Jurisdiction) para “replicar” la priorización de inspectores reales experimentados. Es decir, el PIP intenta

aprovechar la sabiduría colectiva de las AHJ para producir una priorización de inspecciones en ocupaciones que se trata de que coincidan, en la mayoría de los casos, con lo que desarrollaría una AHJ real. (NFPA Data Lab, 2022)

## 2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFE

### 2.3.1. Inteligencia artificial

Al hablar de Inteligencia Artificial se refiere a “*la habilidad de los ordenadores para hacer actividades que normalmente requieren inteligencia humana*” (Rouhiainen, 2018). De otra manera la IA es la facilidad que las máquinas poseen para procesar los datos y utilizarlos en la toma de decisiones de la misma manera que lo haría un ser humano.

La IA puede utilizarse en casi todas las áreas, por ejemplo, en el reconocimiento de imágenes, detección y clasificación de objetos, procesamiento eficiente de datos, mejorar el desempeño de algoritmos, mantenimiento predictivo, protección contra amenazas de ciberseguridad, entre las más relevantes. Actualmente, la IA se está introduciendo cada vez más en aspectos diarios, así como en la industria automotriz, medicina, educación, marketing, seguridad, etc.

Según algunos investigadores, la IA posee cuatro tipos de sistemas que permiten que las máquinas: piensen como personas, actúen como humanos, piensen de manera racional y que actúen de manera racional. (Russell, 2021)

A pesar del estricto cumplimiento normativo en el tema de prevención de incendios en algunos países, como Bolivia, hubo un incremento de 35% en los focos de incendios entre enero y abril de 2020 en comparación al año 2019. En abril de 2020, un análisis de la WWF en conjunto con Boston Consulting Group indica que la cantidad de alarmas de incendios aumentó un 13% en comparación con el año 2019. (WWF, 2020). Esto sucede como consecuencia de la falta de educación de la población, quemas intencionadas, falta de control, evitar a la autoridad al borrar evidencias de crímenes, o vandalismo.

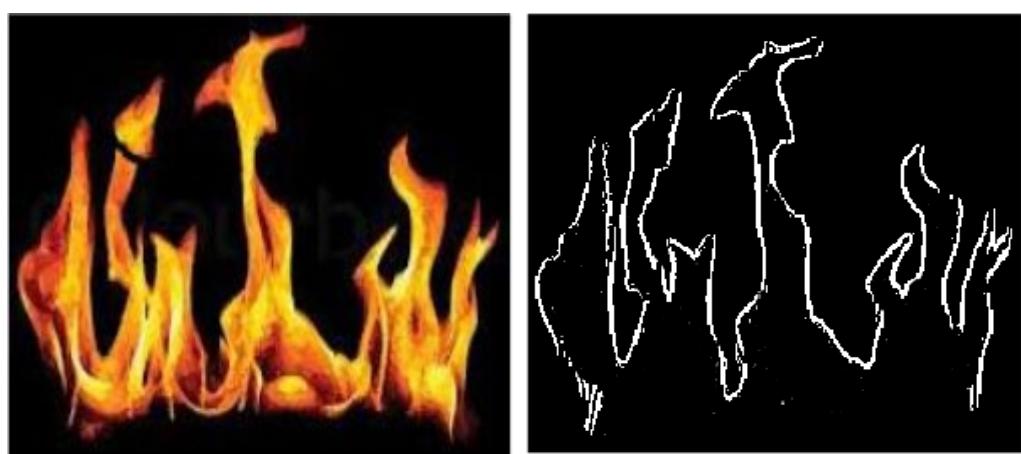
El rápido incremento en el desarrollo de tecnología, ciencias e ingeniería hace posible que más productos que emplean IA puedan ser aplicados a prevenir y luchar contra los incendios. En contraposición, si no se aplica la IA en la prevención de incendios, se afectaría grandemente el desempeño, la calidad de prevenir y combatir incendios, el salvar vidas y proteger los bienes, y no podrían reducir las consecuencias de los incendios y explosiones.

La importancia de detectar a tiempo el inicio de un incendio en instalaciones industriales, ha llevado a instalar un sin número de detectores de calor o de humo siguiendo las recomendaciones de la normativa relacionada, sin embargo, se busca que la detección de un conato de incendio sea lo más rápida posible, es decir, reducir el tiempo en que los humos y gases lleguen a la ubicación del detector de incendios, o reducir el tiempo en que la energía irradiada por la quema de material combustible produzca una variación en la temperatura del recinto y genere la alarma de incendios.

Desde las ocupaciones residenciales hasta las ocupaciones de industria, se poseen sistemas de monitorización por cámaras de video vigilancia. Estas cámaras pueden ayudar a detectar de manera rápida la presencia de un incendio dependiendo de la variación en el color o forma de la imagen que están transmitiendo. Es aquí donde interviene la Inteligencia artificial, se puede emplear el algoritmo openCv para procesar y analizar las imágenes capturadas en el video. El algoritmo CV recopila los detalles de las imágenes en función de 3 colores: rojo, verde y azul. (A Arul *et al*, 2021). Si el valor del color rojo es mayor a 2000 se puede inferir que hay un incendio.

Otra manera de detectar la presencia de llamas o llamas en un ambiente, es mediante la forma de sus bordes. Para esto se emplea un algoritmo utilizado en la búsqueda de bacterias. Con este algoritmo, se identifican los bordes de llamas irregulares en una imagen con color se tiene como ventaja, que los bordes de la llama son claros y continuos. (Chaudhary, A., Rabeja, S., 2014).

**Figura 3.** Llamas reales e imagen de llamas con visión artificial.



Fuente: Chaudhary, A., Rabeja, S., 2014.

Las técnicas de IA aplicadas a la prevención de incendios, también se aplica en el sector agrícola y la prevención de incendios forestales.

### 2.3.2. Sensores inteligentes

La detección de incendios puede llegar a ser vital, ya que podría hacer la distinción para vivir o morir en un incendio. Ciertos grupos no ven necesario tener un framework de identificación, simplemente esperan poder oler el fuego y salir corriendo a tiempo. El tiempo normal para quemar una prenda de vestir en estos días es de solo 60 segundos. En este sentido, cuando se huele el fuego e intenta huir, es probable que el fuego haya consumido la casa. El internet de las cosas (IoT) trabaja con un conjunto de dispositivos conectados y abiertos a través de la web. La “Cosa” en IoT podría aludir a cualquier dispositivo real, pasando de un horno tostador a un automóvil. Estos dispositivos se pueden asociar con la web y ayudarnos a controlarlos o recopilar información de ellos. (Ahmed, K., y Alomgir, M., 2021)

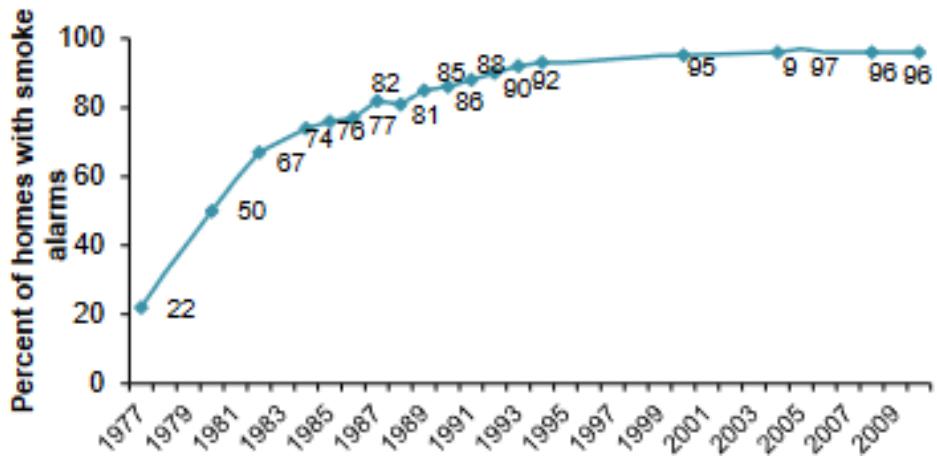
El empleo de sensores inteligentes cableados o inalámbricos, y las redes de sensores, son la columna principal en el tema de protección contra incendios actualmente. Estos sensores pueden ser utilizados para detectar concentraciones de gases productos de la combustión, gases inflamables o fuga de gases peligrosos. Otros sensores, como los sensores de presión, flujo o nivel, pueden emplearse para operar conjuntamente con los sistemas de extinción de incendio como: rociadores y mangueras para activarlos en caso de ser necesario. Se pueden emplear detectores de humo y calor inalámbricos que funcionan a batería, para detectar rápidamente la presencia de humo y calor y ayudar a evacuar a las personas antes de que el incendio se propague. (Tecnologies V, 2020).

Estos sensores inteligentes se emplean con la finalidad de activar automáticamente la supresión de incendios y reducir errores o el tiempo de activación manual.

Los sistemas de detección y notificación de incendios son los primeros que trabajan avisando a los ocupantes de un edificio, de la presencia de fuego o humo en sus instalaciones y permiten ganar tiempo valioso para su evacuación. De acuerdo a la NFPA, las alarmas de humo estuvieron presentes en el 74% de los incendios reportados en casa entre 2014 y 2018. Tres de cada cinco muertes en incendios de casas fueron causados por incendios en propiedades sin detectores de humo (41%) o detectores de humo que no se encontraban operativos (16%). (Ahrens, 2021).

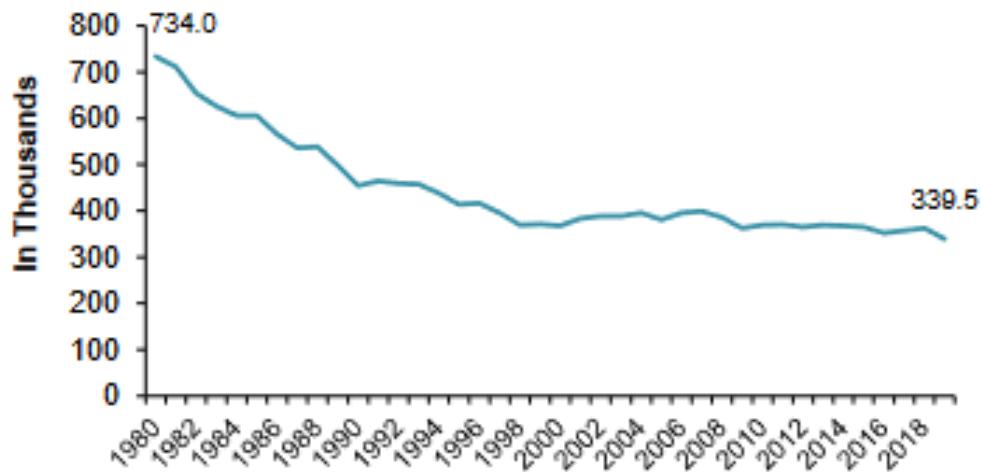
Existe una estrecha relación entre la instalación de detectores de humo con la reducción de incendios estructurales, a mayor cantidad de detectores de humo menor cantidad de reportes de incendios.

**Figura 4.** Crecimiento de la utilización de alarmas de humo en hogares en Estados Unidos: 1977-2010.



Fuente: Ahrens, 2021.

**Figura 5.** Incendios estructurales en casas reportados entre: 1980-2019.



Fuente: Ahrens, 2021.

Adicionalmente, en el reporte de la NFPA se concluye que la posibilidad de fallecer en los incendios estructurales en ocupaciones domésticas reportados, es 55 % menor en los hogares con detectores de humo que funcionan que en los hogares sin alarmas o cuyos detectores no funcionan.

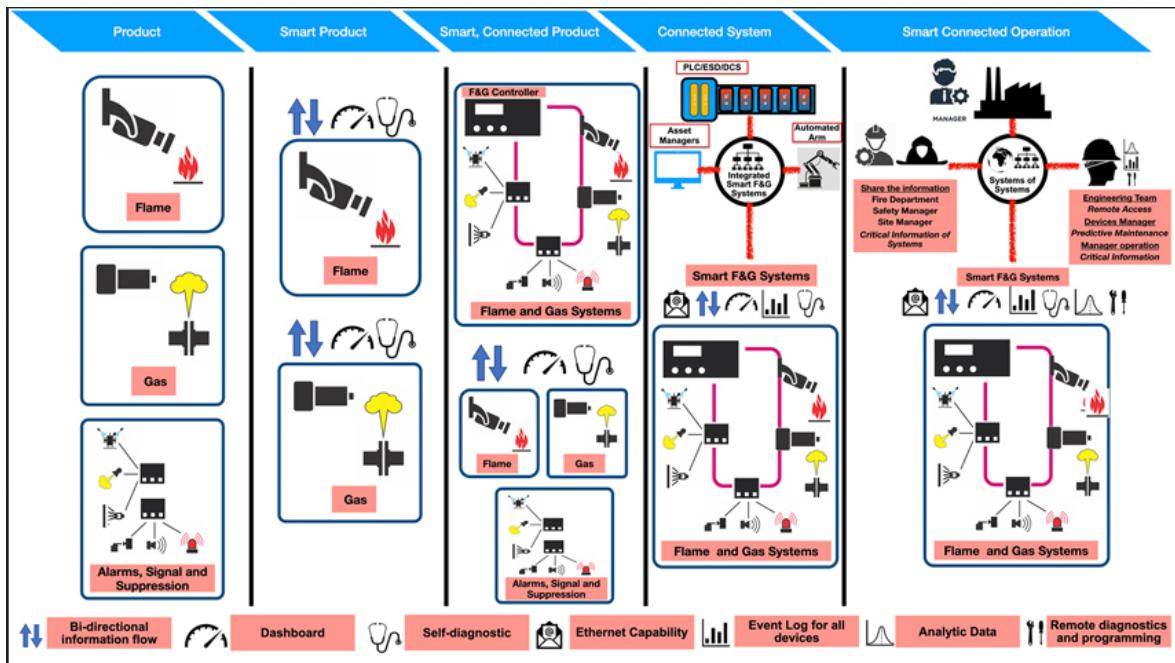
Cuando estuvieron presentes, las alarmas de humo cableadas operaron en el 94 por ciento de

los incendios considerados lo suficientemente grandes como para activar una alarma de humo. Las alarmas a batería funcionaron el 82 por ciento del tiempo. Los problemas con la fuente de alimentación fueron los factores más comunes cuando las alarmas de humo no funcionaron. (Ahrens, 2021).

Al pasar al ámbito industrial, áreas de negocio como la petrolera (plataformas petroleras, refinerías, procesos industriales, tanques de almacenamiento) están integrando a sus sistemas de seguridad contra incendios y gas (F&G) compatibles que detecten llamas o gases combustibles y tóxicos, que puedan identificar la falla de los equipos, activen los equipos de notificación, y recurran al encendido de los sistemas de extinción de incendio según lo especificado en las normas y códigos de la NFPA o Normativa Europea.

Todos los elementos de un sistema de prevención contra incendios F&G se encuentran interconectados mediante múltiples protocolos de comunicación, en el cual, el corazón del sistema es un controlador que sea certificado.

**Figura 6. Elementos de un sistema de seguridad de F&G en industria 4.0**



Fuente: Crosley, B y Ligabo, Y., 2020.

Un sistema de seguridad ideal de F&G tiene una capacidad de comunicación bidireccional, donde los detectores inteligentes de fuego, gas, llama y humo están configurados en una topología redundante tolerante a fallas. Este diseño tolerante a fallas tiene aislamiento incorporado para cada dispositivo. El controlador del sistema de seguridad de F&G analiza

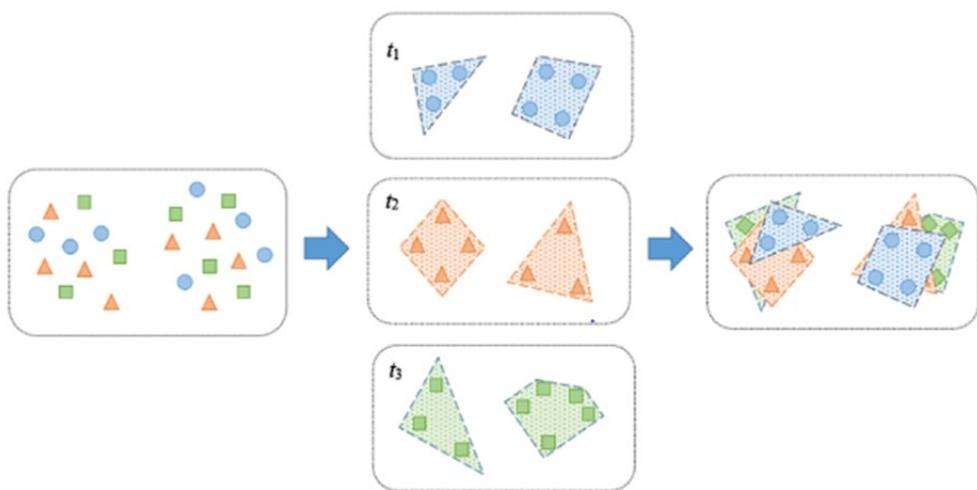
continuamente los datos a través de un bucle de información tolerante a fallas bidireccional en una red operativa local (LON).

### 2.3.3. Cloud computing

La conectividad con la nube y el empleo del internet están cambiando la manera de trabajar en las industrias, e incluye la prevención contra incendios. Esta tecnología de la Industria 4.0 ayuda a mejorar el trabajo entre la máquina y el ser humano. Los datos provenientes de los sensores se pueden almacenar en la nube de manera segura, estando accesibles en todo momento, en todo lugar y en todo el tiempo. Utilizando correctamente los flujos de trabajo, los datos pueden ser vistos en teléfonos inteligentes, tabletas, etc. con lo que se puede posicionar al personal de combate de incendios en una ubicación más segura.

El ayudar a ubicar rápidamente el sitio de una emergencia, permite reducir los tiempos de atención al incendio, debido a que el tiempo de atención es un factor muy importante en un incendio.

**Figura 7.** Flujo de minería de reglas de asociación basada en TDP.



Fuente: Zhang, 2021

El desarrollo del cloud computing y el análisis de big data ha dado lugar a varios métodos de predicción de desastres. Para reducir la probabilidad de accidentes por incendio, es fundamental predecir el riesgo de incendio mediante la extracción de datos históricos masivos sobre incendios. (Zhang, 2021). Utilizando herramientas como el MapReduce en el procesamiento paralelo de datos, se pueden desarrollar métodos de predicción de riesgos de incendios considerando los factores causantes de incendios y los elementos que se emplean

para mitigarlos. Para esto se han desarrollado algoritmos como DBSCAN que emplea datos históricos de incendios que involucran a dimensiones de espacio y tiempo, así mismo, se han empleado algoritmos de minería de reglas de asociación basados en TDP para valorar cuantitativamente el peligro a generar llamas.

La mayoría de estas herramientas y modelos de predicción/mapeo se diseñaron para ejecutarse en una sola máquina local o en un clúster de alto rendimiento, ninguno de los cuales puede adaptarse a las necesidades de los usuarios. El proceso de instalar estas herramientas y modelar su configuración puede ser en sí mismo un proceso tedioso y lento. Por lo tanto, no son adecuados para sistemas de emergencia ciberfísicos con limitaciones de tiempo. (Garg et al., 2018)

#### 2.3.4. Blockchain

El Blockchain es una tecnología digital incorruptible que permite almacenar y compartir datos e información a través de Internet. La tecnología Blockchain descentraliza el almacenamiento de datos, lo que lo hace casi seguro de los piratas informáticos, ya que no hay una fuente única de datos almacenados. Cada sistema en el que se comparten los datos se convierte en el servidor. La tecnología Blockchain en la industria de protección contra incendios puede ayudar a optimizar los datos y la comunicación entre contratistas, fabricantes, proveedores, compañías de seguros y usuarios.

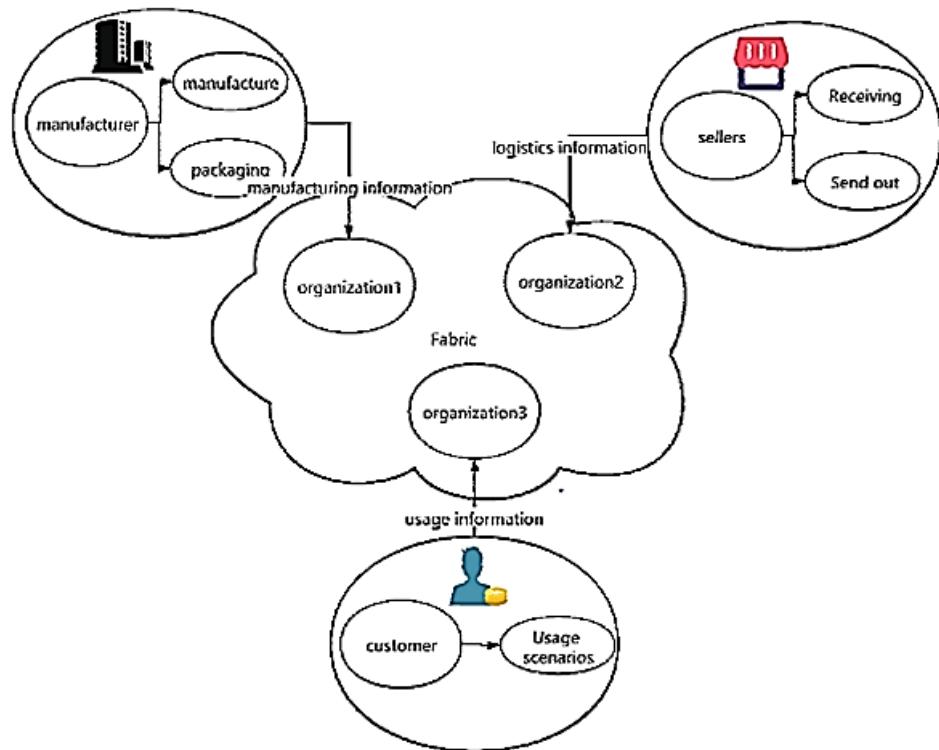
El Blockchain puede ayudar a eliminar las brechas de comunicación entre los integrantes del ecosistema de prevención de incendios, permite que la información esté disponible para todas las partes en todo tiempo y se transmita de manera segura entre las partes interesadas. (Tecnologies V, 2020).

Ante la posibilidad de que equipos tan esenciales en el combate de incendios, como un extintor de polvo químico, sea adulterado, falsificado o no se conozca cuál es su origen o procedencia, surge la necesidad de asegurar que el producto que el cliente recibe ha cumplido con los estándares de calidad y la normativa correspondiente.

Ante esta necesidad, surge como respuesta del empleo del blockchain en los equipos de prevención de incendios. Se puede tener un sistema de trazabilidad de equipos para combatir el fuego basado en blockchain, éste toma los equipos de combate de incendios como el objeto de trazabilidad, y la plataforma de cadena de bloques de fábrica como base para registrar y

rastrear los datos de producción, procesamiento, logística, transporte, ventas, uso y otros procesos.

**Figura 8. Flujo del sistema.**



Fuente: Bao, 2021

Empleando el blockchain, se ha mejorado aún más el rendimiento de los sistemas de trazabilidad de los dispositivos de ataque de incendios. Al emplear tecnología blockchain, el conjunto de datos generado por los equipos es difíciles de manipular y se puede rastrear a los que intervienen en la distribución de los equipos hasta el usuario final. Con esto se transparenta la información y se genera la confianza con la marca proveedora al asegurar que no son equipos falsificados o clonados y que no cumplen las normativas de prevención de incendios.

#### 2.4. Análisis de incendios en diferentes tipos de ocupaciones

En este apartado se van a describir los incendios que mayor cantidad de víctimas han dejado en países latinoamericanos. Se describirán los antecedentes y los resultados de las investigaciones oficiales con el fin de establecer si los dispositivos de prevención de incendios respondieron adecuadamente a la emergencia.

#### 2.4.1. Catástrofe en el Supermercado Ycuá Bolaños

El incendio que se va a describir es uno de los más catastróficos e importantes ocurridos a nivel mundial en los últimos años en edificaciones denominadas como de reunión pública o de utilización mercantil. La investigación de lo ocurrido en este supermercado se realizó por parte de la ATF (Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosive) de los Estados Unidos. La NFPA no fue llamada a realizar la investigación del siniestro.

##### 2.4.1.1. Ubicación y descripción.

El 01 de agosto de 2004 en Paraguay, específicamente en la ciudad de Asunción, se produjo el incendio de un moderno edificio de supermercado que ocasionó 426 fallecidos, más de 510 heridos y la pérdida total de la edificación.

El supermercado estaba conformado por 2 plantas, cada una con un área aproximada de 4.000m<sup>2</sup>. La planta inferior era el área cubierta para el parqueadero de 163 vehículos y se encontraba a nivel de la calle, mientras que en la planta superior se encontraban las áreas de ventas, los locales de comidas, panadería, los almacenes y otros servicios. También se encontraban dos mezanines o entrepisos, el de las oficinas administrativas en el lado sur y el de un sector adicional de patio de comidas en el lado norte. El aforo era de 324 personas sentadas entre ambos sectores de los patios de comidas.

El edificio poseía una estructura de hormigón armado y se utilizó cemento para la mampostería, también se utilizó estructura metálica. Esta estructura metálica tenía recubrimiento de protección contra incendios. El techo era de lámina metálica con canales bajo la cual se aplicó un recubrimiento (entre 25 a 250mm de espesor) de espuma de poliuretano (material combustible). Adicionalmente, para el cielo falso se empleó estructura tipo sánduche con poliestireno y capas de yeso.

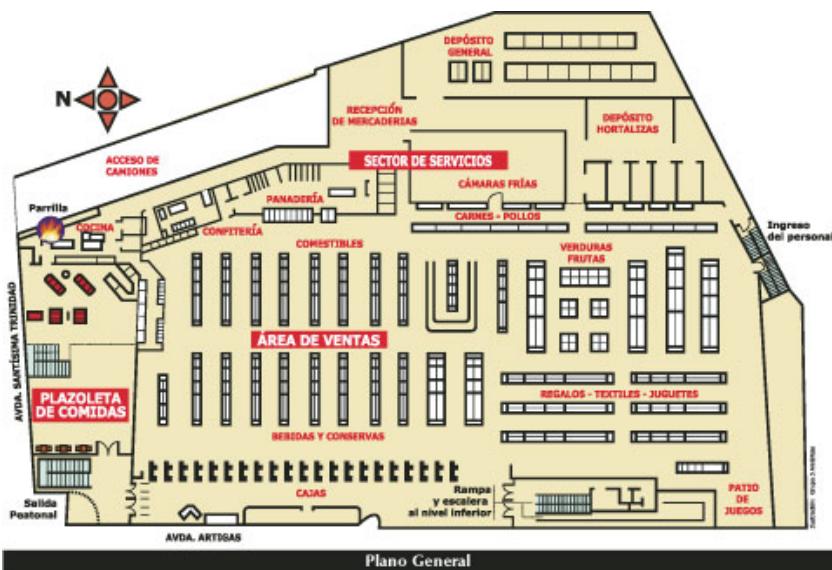
##### 2.4.1.2. Sistemas de prevención de incendios.

El supermercado tenía instalado gabinetes de mangueras que eran alimentadas por el sistema de presurización propio del edificio y poseía una conexión siamesa en la fachada. A pesar de poseer las bombas contra incendios y demás elementos instalados, no se pudo comprobar si el sistema de mangueras llegó a funcionar debido a que el suministro de agua no se encontraba operativo.

El edificio tenía instalado varios tipos de detectores. Los detectores de humo fotoeléctricos en las áreas de comida y servicios, y por detectores termovelocimétricos en el área de parqueaderos, panadería y cocina. El sistema de detección contaba con 49 detectores de calor termovelocimétricos, 90 detectores de humo fotoeléctricos, varias estaciones de alarma manual y varios dispositivos de notificación visual y sonora. Los dispositivos se encontraban agrupados en 20 zonas con detección convencional y se conectaban al panel principal de incendios de la clase antirrobo. De acuerdo a testimonios, durante el incendio no se escucharon las alarmas de notificación.

Se utilizaban dos tipos de cocinas: una de tipo industrial que se ocupaba en el patio de comidas utilizaba dos tanques de gas propano-butano, y otra de tipo parrillada que empleaba carbón como. La campana de la parrillada se comunicaba con un extractor eléctrico ubicado en el techo del edificio mediante ductos de acero galvanizado. La panadería empleaba todos sus hornos eléctricos. Se empleaba aire acondicionado distribuido por ductos ubicados entre el cielo falso y el techo en el espacio para las ventas.

**Figura 9. Plano de implantación del edificio.**



Fuente: Álvarez, 2014.

#### 2.4.1.3. El incendio.

Luego de las investigaciones, personal de la ATF determinó que el incendio empezó en una chimenea de la parrilla, en una sección horizontal donde se encontraba acumulada la grasa, hollín y ceniza. Al aumentar el calor, la soportería del ducto falló y se desprendió, derramando el producto combustible sobre el techo. Recordemos que el techo tenía poliuretano, el mismo

que se combustionó y permitió que el fuego avance por las pendientes del techo a las otras áreas del supermercado.

El incendio que se desarrollaba entre el cielo falso y el techo se incrementó hasta que debilitó la sujeción del cielo falso y produjo la caída de los vidrios que separaba el patio de comidas del local de ventas. Al caer la pared de vidrio, se produjo un importante ingreso de oxígeno que ayudó a que los gases calientes se combustionaran provocando el flash over o conocida como marea de fuego a la parte sur del supermercado. Esta bola de fuego fue incrementando su potencial destructor al seguir cayendo el resto del cielo falso.

Las llamas generaron suficiente presión para ser impulsadas hasta los estacionamientos que se encontraban en el nivel inferior. La rampa de acceso a los estacionamientos no tenía RF en sus paredes. Los efectos de los daños se observan en el lado sur del edificio debido a que en este sector del edificio se encontraba mayor cantidad de material combustible como ropa, textiles, cartones, etc. Algunos testigos señalan que el fuego “caía desde el techo” e inclusive hicieron referencia de explosiones que se debieron al estallido de los aerosoles y un compresor de una de las cámaras frigoríficas.

#### 2.4.1.4. Análisis Normativo.

El edificio construido tenía todas las aprobaciones municipales de la ciudad de Asunción, por lo que los elementos de prevención de incendios instalados eran los solicitados por la ordenanza correspondiente.

Al hacer el análisis normativo del cumplimiento de la NFPA 101 -Código de seguridad humana- versión 2003, se tienen lo siguiente:

- ▶ El edificio no poseía rociadores.
- ▶ Los ductos de extracción de gases de la parrilla no estaban construidos según la NFPA 96.
- ▶ Las cantidades de salidas de emergencia no eran las suficientes de acuerdo al aforo que se encontraba en ese momento.
- ▶ El sistema de detección de incendios no trabajó adecuadamente.
- ▶ Las distancias de recorrido a las salidas no cumplían el máximo establecido.
- ▶ No existía señalización de la ruta de escape.
- ▶ La espuma de poliuretano era combustible y no poseía certificación UL 1256 Estándar para probar la seguridad de incendios de materiales de techo (Standard for Safety for Fire Test

of Roof Deck) o FM 4450: Estándar para la prueba de material aislante de techos (Test Standard for Class 1 Insulated Steel Deck Roofs.)

#### 2.4.2. Incendio de la Discoteca Kiss

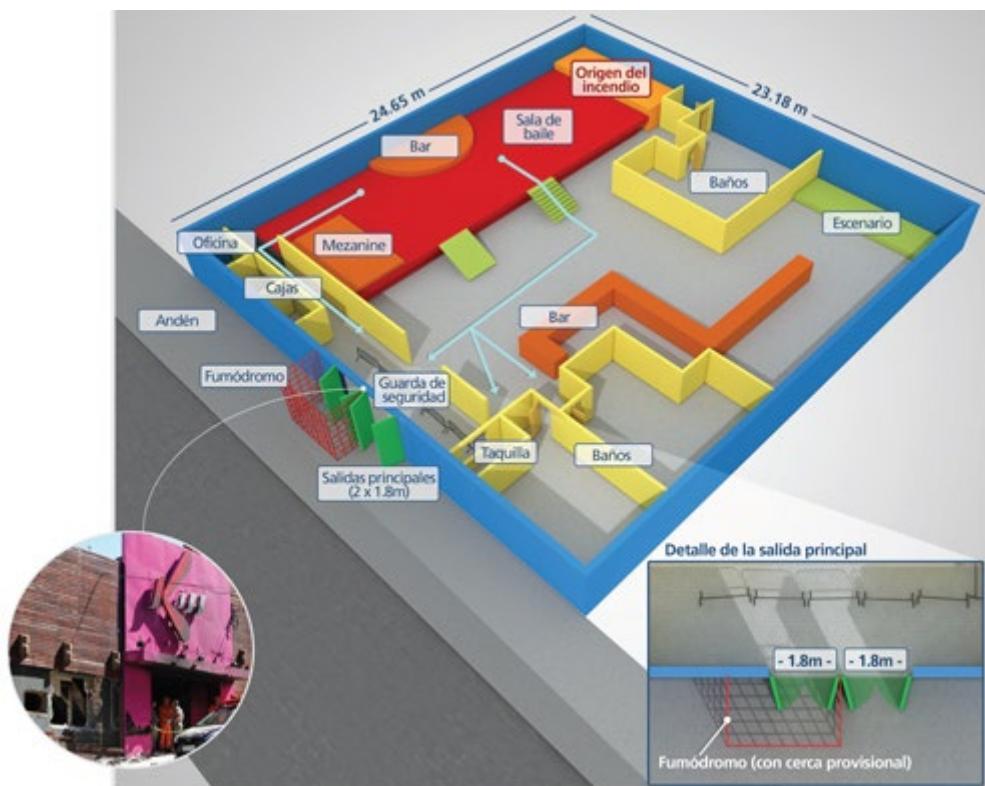
El incendio más letal en una discoteca en Latinoamérica y uno de los más mortales en el mundo es el ocurrido en la Discoteca Kiss.

El Cuerpo de Bomberos de Rio Grande do Sul realizó la investigación del incendio. Los investigadores de la NFPA apoyaron en la recopilación de los datos tras la catástrofe.

##### 2.4.2.1. Ubicación y descripción.

La discoteca se encontraba ubicada en la ciudad universitaria de Santa Marta, en el estado de Rio Grande do Sul en Brasil. Debido a una fiesta organizada por la facultad de agronomía, en el lugar se encontraban entre 1.000 y 1.500 personas. El aforo era de 691 personas. El área construida era de 613 m<sup>2</sup>.

**Figura 10.** Plano de implantación de la discoteca.



Fuente: Moncada, 2014.

La discoteca era de un solo piso, rodeado por edificios en sus tres lados. La única fachada poseía un ancho total de 3,60m dividido en dos salidas continuas. Sin embargo, una de estas

puertas daba a una parte denominada fumódromo, que tenía una reja metálica que permitía salir a los clientes que deseaban fumar, pero no permitía abandonar el lugar. En estas discotecas el cliente va llenando una cartilla con todos sus consumos de la noche para cancelarlos en caja a la salida. Una vez cancelada la cuenta, el cliente puede salir libremente. Esto ocasiona que, en caso de emergencia, la seguridad no permita la salida libre de las personas confundiéndolo con clientes que desean salir sin pagar.

Para reducir el eco del sonido se instaló, en las paredes y en el techo, espuma de poliuretano expandido sin tratamiento con retardante a las llamas.

El poliuretano es un material que al quemarse o evaporarse produce ácido cianhídrico -HCN- que es 25 veces más mortal que el monóxido de carbono, causa paro respiratorio y la muerte. Las autopsias a los cuerpos revelaron al ácido cianhídrico como la principal causa de su muerte.

#### 2.4.2.2. Sistemas de prevención de incendios.

La discoteca contaba con extintores contra incendios, no poseía: rociadores, ni sistemas de alarmas de incendios, señalización de vías de evacuación, lámparas de emergencia o gabinetes de mangueras.

La espuma de poliuretano expandido no tenía retardante al fuego.

Las vías de evacuación eran restringidas y no era suficiente para el aforo del local en el momento del incendio.

#### 2.4.2.3. El incendio.

A las 03 de la mañana del día 27 de enero de 2013, un grupo musical inicia su actuación. Luego de 15 minutos, un artefacto pirotécnico diseñado para ser utilizado en exteriores, es disparado a control remoto por uno de los cantantes. El artista alza la mano y el fuego que exhalaba por la bengala, alcanza las planchas de poliuretano expandido del techo, y se prende rápidamente.

Esta espuma se emplea para reducir el sonido en lugares que generan ruido como son sitios de maquinado, generadores de energía, discotecas, etc.

En medio de la confusión, un empleado utiliza un extintor que no funciona y luego de que el fuego se propaga por el techo del escenario, el empleado toma el micrófono y anuncia que se evacúe la pista de baile. El anuncio lo escucha la gente que está en la zona de baile y no lo escuchan las personas que se encontraban en los otros ambientes. Las personas de la pista de baile se dirigen a la única salida de la discoteca, donde son retenidos por los guardias que,

luego de un forcejeo y discusión, liberan las salidas. Esto ocasiona, en la única puerta de evacuación, un cuello de botella.

Luego de 120 o 180 segundos el lugar se encontraba llena de humareda y los ocupantes de las otras áreas no se habían percatado del incendio. Posteriormente, el fluido eléctrico se pierde y no hay iluminación de emergencia. El lugar no poseía luces de emergencia ni señalización de evacuación iluminada.

Algunos de los asistentes en su desesperación confunden el ingreso a los baños con la salida de emergencias debido a que desde los baños se percibía una tenue luz verde y algunas personas pudieron confundir esa luz con una señal de salida. En esta área se encontraron más de 100 muertos.

A la llegada de los bomberos, el edificio estaba saturado de humo negro e irrespirable, y se dan cuenta de que el incendio se había auto extinguido no por la demora en la llegada del equipo de emergencias sino por la velocidad en que se desarrolla los incendios en este tipo material.

#### 2.4.2.4. Análisis Normativo.

Durante la investigación, se estableció que la normativa local no permitía que las salidas de emergencia sean cambiadas, sustituir el poliuretano o exigir el funcionamiento de rociadores automáticos.

Adicionalmente, no se poseía una regulación de empleo de fuegos pirotécnicos en espacios cerrados.

Lo que se tiene claro, es que la discoteca tenía una cantidad exagerada de personas, casi el doble del aforo permitido por los bomberos.

#### 2.4.3. Incendio de Mesa Redonda

A continuación, se va a realizar la descripción de uno de los incendios más mortíferos en un lugar no catalogado por la NFPA, debido a que se trata de ventas informales ubicadas a las afueras de los locales comerciales.

##### 2.4.3.1. Ubicación y descripción.

Mesa Redonda en una zona que se encuentra en el centro de la ciudad de Lima, capital de Perú. Esta zona es muy comercial y tiene una gran cantidad de vendedores informales y compradores. La cantidad de gente aumenta considerablemente en fechas festivas de fin de

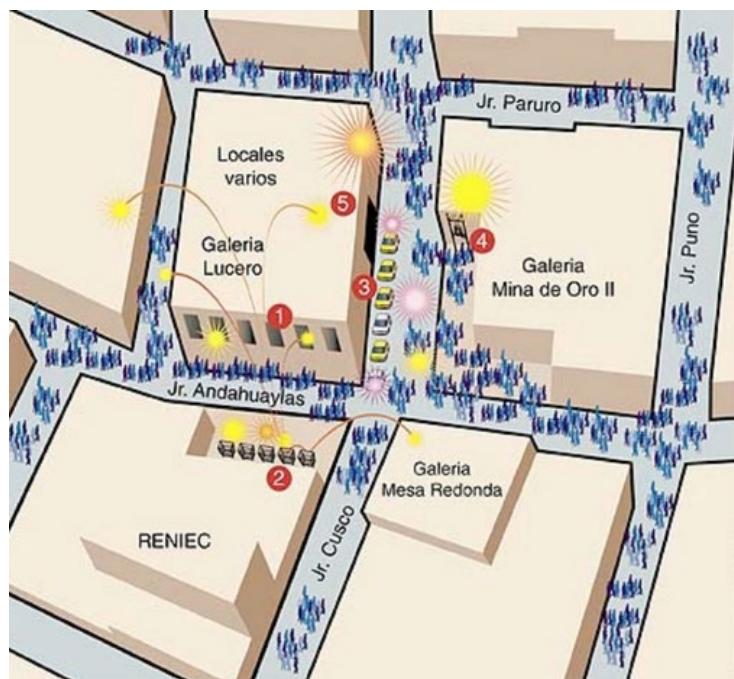
año y concentra la venta de juegos pirotécnicos. En esta zona se habían presentado por lo menos 6 incendios importantes antes del evento del 29 de diciembre de 2001.

Para las festividades de fin de año, se estima que en este lugar se encontraban unas 900 toneladas de juegos pirotécnicos importados desde China.

Como material pirotécnico se tiene: coheteillos, coheteones y los arrancadores; los que convirtieron el lugar en un infierno mortal.

En una de las calles aledañas, existía un transformador que, según las investigaciones, pudo ocasionar el deceso de unas 25 personas debido a que las protecciones de los cables se habían consumido con el calor y en conjunto con el agua, permitía que la corriente eléctrica de miles de voltios afectara a las personas que huían por el sector.

**Figura 11.** Esquema del área afectada por el incendio.



Fuente: Arce, 2008.

#### 2.4.3.2. Sistemas de prevención de incendios.

Al tratarse de locales informales de venta en la vía pública, no existían elementos básicos de prevención de incendios. Ningún comerciante poseía extintor portátil de ningún tipo.

Los locales comerciales o galerías no poseían sistemas de extinción como rociadores. Algunos edificios de locales comerciales no tenían rutas o vías de evacuación, por lo que muchas víctimas fueron encontradas en dichos locales calcinadas y agazapadas.

A pesar de ser un lugar abierto, existía una cantidad enorme de personas caminando por las calles del sitio de la tragedia, lo que ocasionó que los equipos de emergencia lleguen a tiempo por el tráfico y la marea de gente que huía del sitio del incendio.

#### 2.4.3.3. El incendio.

El 29 de diciembre de 2001, un vendedor por realizar una venta, activó un fuego pirotécnico a las 19:15 que contaminó con llamas el resto de puestos de ventas. La marea de fuego alcanzó la altura de 20 metros de altura desplazándose por varias calles y destruyó varias casas que eran empleadas como locales comerciales. En esta zona conocida como Mesa Redonda, se acumulaba gran cantidad de mercadería legal e ilegal como las 900 toneladas de material explosivo.

El fuego se esparcía de local en local debido a la alta concentración de material pirotécnico que hacía el efecto cadena al incendiarse y esparcir el fuego a los lugares alrededor.

En las calles los vehículos con personas dentro fueron alcanzados por la bola de fuego y los menores de edad que dormían en los vehículos fueron calcinados por las altas temperaturas. El incendio ocasionó 291 personas fallecidas, 247 heridos. Las pérdidas económicas fueron aproximadamente de 10 millones de dólares de EEUU. La temperatura de la zona central del incendio llegó a los 1.200º C carbonizando a las personas, y la marea de llamas de 800ºC se movió por las calles arrasando con los seres vivos y autos estacionados.

De acuerdo al Instituto de Defensa Civil del Perú, se reportaron los siguientes daños: locales destruidos, 1 vivienda destruida, 15 autos quemados, 29 galerías (locales) comerciales quemados, 4.500 m<sup>2</sup> afectados por el fuego.

#### 2.4.3.4. Análisis Normativo.

La investigación demostró la negligencia de las autoridades, compradores y comerciantes, y el caso omiso a la normativa de prevención, aunque los técnicos del cuerpo de bomberos denunciaban reiteradamente el incumplimiento normativo local y nacional.

#### 2.4.4. Incendio en Cárcel Estatal Comayagua

Hasta este punto se han descrito algunos tipos de incendios en ocupaciones comerciales, de concentración pública, y mercantiles. A continuación, se va a realizar la descripción de uno de los incendios con más prisiones muertas en la era moderna en una ocupación denominada como centros de rehabilitación y correccional, que son ocupaciones donde la gran parte de

sus reos no tiene la capacidad de resguardarse por las restricciones en los grados de libertad que posee.

#### 2.4.4.1. Ubicación y descripción.

La prisión se encuentra ubicada en Comayagua, Honduras. Esta era una de las cárceles con más personas acinadas que en su mayor parte son presos que pertenece a las pandillas extremadamente violentas.

El lugar destinado para la residencia de los presos era de tamaño reducido. Los cubículos y literas estaban construidas con materiales altamente combustibles.

El complejo penitenciario fue construido como un modelo de granja penitenciaria en la década de los años 40, y ocupaba 15 hectáreas rodeada por una cerca de 2.4m de altura. La zona de dormitorios de los reclusos era de muro de ladrillo o bloque, los pisos de concreto o azulejo y techos con acero y madera. La estructura de residencia de los presos tenía 29 m por 16 m. Cada una tenía 10 módulos donde almacenaba a los reclusos.

La cárcel fue diseñada para un aforo de 520 personas, pero el momento del incendio se encontraban 852 reos.

La celda donde se inició el incendio tenía 5.5 m por 15 m que alojaba a 96 presos con dos hileras de literas. La única entrada al sitio se encontraba en el centro de la celda y era de 140 por 203 centímetros. Todas las ventanas se encontraban protegidas por barrotes.

Para tener algo de privacidad, los reos encerraban sus camas con diferentes elementos combustibles como son: placas de madera, telas, sábanas, cortinas, cobertores, toallas, cocidas entre sí. Cada cama poseía un colchón de poliuretano envuelto en tela.

De acuerdo con la ATF, en el lugar del incendio se encontraban más de 58 m<sup>2</sup> de telas colgadas y más de 15 m<sup>3</sup> de material empleado como relleno de colchón. En el lugar de las camas se encontraban extensiones eléctricas conectadas a pequeños electrodomésticos (televisores, radios, hornos microondas, planchas, etc.)

#### 2.4.4.2. Sistemas contra incendios.

Los módulos donde se encontraban los reclusos con contaba con ningún tipo de protección contra incendios, es decir, no poseían rociadores automáticos, sensores de incendios, avisos

manuales de incendio o extintores.

#### 2.4.4.3. El incendio.

Todo empezó el 14 de febrero por la noche, no se conoce la hora exacta, pero se estima que fue a las 10:20 pm.

La investigación de la ATF señala que los reos se despertaron por las llamas en una litera. Trataron de contener el fuego arrojándole agua con un valde, sin embargo, el fuego siguió avanzando hasta los otros módulos. Una persona de enfermería se percata de los gritos y corre a abrir las puertas de los módulos.

Según el informe de la ATF: *“el incendio se originó dentro y/o alrededor de la parte superior de dos camas en la cuarta columna de literas, contando desde la puerta del módulo, contra el muro oeste del Módulo 6. Se cree que la causa del incendio fue la aplicación no intencional de una llama abierta o materiales para fumar en combustibles disponibles, posiblemente una de las cortinas u otros materiales combustibles que rodean las literas.”* (Moncada, 2014)

**Figura 12.** Incendio en cárcel de Comayagua.



Fuente: Moncada, 2014.

#### 2.4.4.4. Análisis Normativo.

La norma NFPA exige que en este tipo de ocupaciones donde la movilidad de las personas es reducida y según las características constructivas, se debía disponer de:

- Sistema de rociadores y de detección de humo en las zonas destinadas a dormitorios.
- Las alarmas de incendios deben notificar de manera inmediata el fuego.

- Por el apiñamiento de las personas en los dormitorios, todos los materiales empleados deben ser a prueba de fuego o tener un RF de 120 minutos.
- Los módulos deben estar separados por material ignífugo y resistente al humo.

## 2.5. Normativa de prevención de incendios relacionada a Industria 4.0

En este capítulo se va a exponer la normativa relacionada a los sistemas de prevención de incendios que se relacionan con las tecnologías de Industria 4.0.

### 2.5.1. Ciberseguridad

“Mientras más avanza la tecnología, más integrada se vuelve” (Mahoney, 2021), es una frase que resume lo que sucede con los sistemas de una industria u organización, es decir, los diferentes sistemas se encuentran conectados o integrados utilizando una intranet o el internet.

La detección y alarma de fuego de una ocupación, sea comercial, industrial, de salud o educación, pueden estar integrados a otros sistemas y expuestos al mismo tipo de ciberamenazas que un sistema de gestión de información o de transacciones económicas.

Ante esta realidad, la NFPA ha incluido un capítulo en la edición 2022 de la NFPA72-Código Nacional de Alarmas de Incendios y Señalización-.

En el capítulo 11 de la NFPA72: 2022 se señala que donde se requiera por las leyes del gobierno, códigos o estándares, o en otras partes de este Código, se debe proveer de ciberseguridad al software, herramientas, firmware, equipos, métodos de instalación, pruebas, seguridad física y acceso a equipos, rutas de datos y mantenimiento.

Esta iniciativa de poner lineamientos sobre el tema de ciberseguridad, surgió al tomar en cuenta los comentarios que las personas relacionadas con los dispositivos de detección de fuego, realizaron al comité de la NFPA 72 en el sentido de que los usuarios del código trabajan para empresas que han sufrido los ataques de los hackers informáticos y que si sufren otro ataque puede haber consecuencias significativas en los sistemas de prevención de incendios.

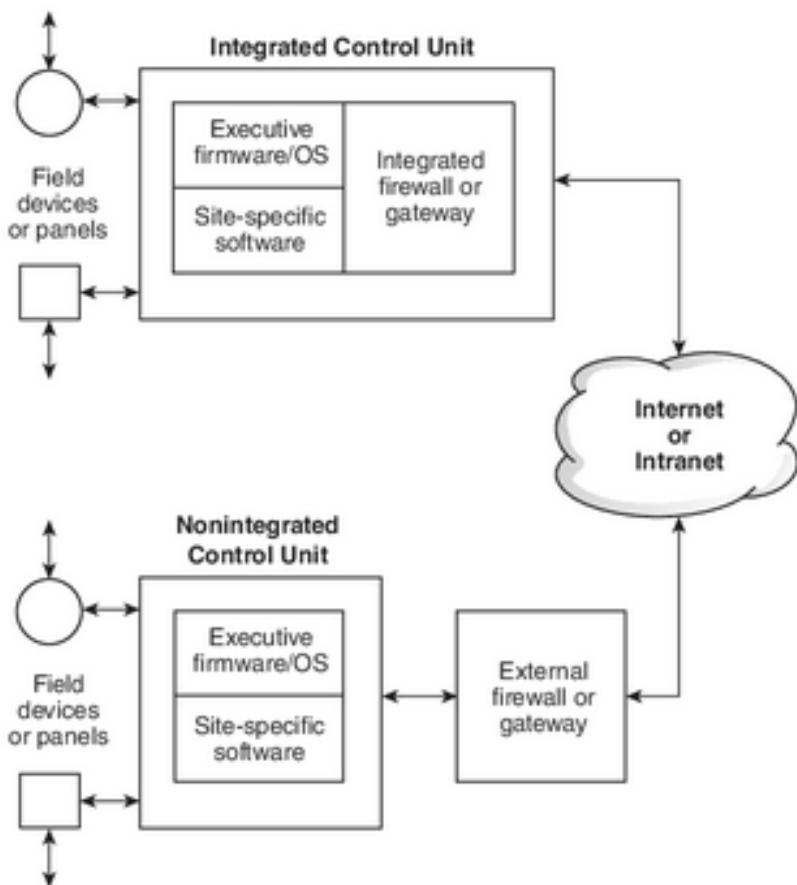
Con estas recomendaciones, la NFPA admite el acceso remoto a los sistemas de alarmas y señalización de incendios para llevar a cabo distintas tareas, como reconfiguración, silenciamiento, realización de diagnósticos y actualización del software. Anteriormente el código no se pronunciaba al respecto. (INMA, 2021)

Esta autorización permite reconocer algo que sucede extensamente en la instalación y operación de las alarmas de incendios, el acceso remoto. La mayoría de los elementos de un sistema de alarmas de incendios están conectadas a Internet, a una red interna o a una infraestructura de comunicaciones, lo que facilita a los fabricantes de estos dispositivos, realizar tareas como instalar actualizaciones. Adicionalmente, los técnicos encargados de la seguridad humana, pueden monitorear el estado de los dispositivos y darles mantenimiento, debido a que, si los fabricantes o instaladores deben corregir un error en la programación o existe alguna falla, no desean que un ejército de técnicos vaya a campo a actualizar 2,000 alarmas instaladas en las instalaciones, es más rápido y cómodo hacer todo el proceso de actualización o mantenimiento pulsando un botón en sus oficinas.

Adicionalmente, esta versión de la norma NFPA 72 incluye el Anexo J que incluye lineamientos de cómo mejorar la ciberseguridad para los sistemas de detección y alarmas de incendios. Los elementos más sobresalientes que se exponen en el anexo J son:

- Estándares de Ciberseguridad. Los sistemas deben poseer diseño, instalación y mantenimiento según uno o más de los siguientes estándares: ANSI/ISA/IEC-62443-4-2, NISTIR 8259, NIST, UL 2900-2-3, otra normativa aceptada por la autoridad competente.
- Evidencia de cumplimiento. Se debe evidenciar el cumplimiento de ciberseguridad mediante: Certificado de cumplimiento emitido por un reconocido laboratorio de pruebas, certificación del fabricante del sistema provisto, evaluación o certificación aceptada por la autoridad con jurisdicción.
- La documentación generada en el tema de ciberseguridad, debe ser incluida con el resto de documentación de los sistemas de detección y alarmas de incendio.
- Incluir certificados de mantenimiento de los sistemas de ciberseguridad con periodicidad anual.
- Como se observa en la figura, dependiendo de si el firewall/Gateway están integrados o no, se deberá hacer un retest de los sistemas si se hacen cambios en el sistema de detección ya alarmas de incendios.

**Figura 13. Funcionamiento típico de un sistema Firewall/Gateway.**



Fuente: NFPA, 2022

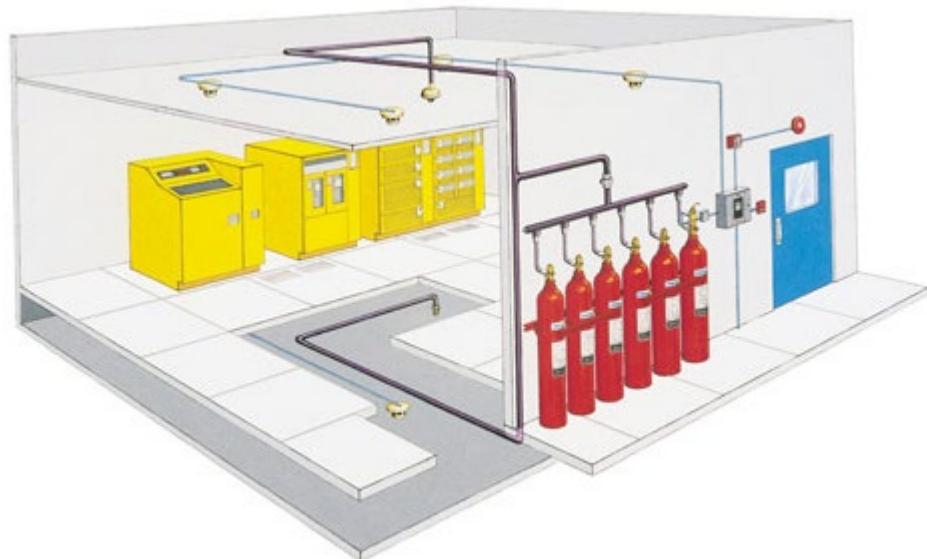
### 2.5.2. Data Centers

Con el incremento de los dispositivos digitales, la utilización de sensores y actuadores a nivel industrial, está en auge la utilización de los centros de datos o conocidos como data centers. Las empresas e instituciones públicas emplean varios servicios en la nube, análisis de datos, big data o hostings. Adicionalmente, el avance de las telecomunicaciones permite que una organización gestione sus datos mediante los data centers los mismos que pueden estar ubicados en cualquier parte del planeta.

Lo que caracteriza a los data centers respecto a su infraestructura y que aumenta su vulnerabilidad ante un incendio son:

- Alta utilización de energía y generación de calor.
- Cableado eléctrico recubierto con material combustible.
- Materiales plásticos de servidores u otros dispositivos.
- Elementos no visibles en cielo y piso falso.

**Figura 14.** Sistemas de prevención de incendios en data centers.



Fuente: NFPA, 2022

En el transcurso de los años, y luego de varios incendios en centros de data centers, la NFPA ha generado dos estándares cuya finalidad es establecer los requisitos para prevenir incendios en estas ocupaciones:

- NFPA 75. Norma para la protección de equipos electrónicos procesadores de datos por computadora.
- NFPA 76. Norma para la protección contra incendios en establecimientos de telecomunicaciones.

En ambos casos, la normativa sugiere el empleo de agentes limpios para la extinción del incendio, instalar detectores de respuesta rápida y extintores portátiles. Como elementos de protección pasiva, se debe tener paredes con resistencia al fuego, restringir el paso de humo y fuego a través de las aberturas que posea la construcción.

La instalación de los detectores de respuesta rápida o temprana, se emplea la norma NFPA 72 y todas sus recomendaciones en cuanto a su instalación y comunicación entre ellos y con el panel de control central.

### 2.5.3. Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva ha tenido un gran auge en los últimos años elaborando desde pequeños componentes decorativos hasta puentes fabricados de acero o concreto. (Yalcinkaya, 2018).

El primer puente de acero peatonal de 12 metros de luz fue construido con brazos robóticos de 6 ejes de libertad a lo largo de 6 meses. Se empleó un digital twin con la finalidad de responder en tiempo real a las variaciones del modelo y precautelar la seguridad en el proceso de fabricación. Para este caso se empleó como material de construcción acero de bajo contenido de carbono aplicado mediante metal fundido. En el año 2017 el primer puente construido en impresión 3d fue elaborado en Holanda.

Aunque parece que la fabricación aditiva no tiene límites, implica grandes riesgos de incendio y explosión cuando se emplean metales combustibles.

Existen incendios que tienen como material combustible a algunos metales, estos metales son: titanio, sodio, magnesio, circonio, potasio y litio. A estos incendios se les denomina Incendios Clase D. Estos incendios no pueden ser combatidos con agua o agentes de extinción comunes, solamente pueden ser extinguidos con agentes etiquetados para combatir incendios Clase D. Si se desea más información de los extintores en general se debe recurrir a la norma NFPA 10 Norma para extintores portátiles de incendios.

Con la finalidad de dar lineamientos y pautas claras en el manejo de los materiales combustibles en polvo, la norma NFPA 484 Estándar para Metales Combustibles se aplica a la producción, procesamiento, acabado, manipulación, reciclaje, almacenamiento y uso de todos los metales y aleaciones que se encuentren en una forma capaz de producir combustión o explosión, así como abarca las operaciones en las que el metal o las aleaciones metálicas estén sujetas a operaciones de procesamiento o acabado que producen polvo o polvo combustible.

La norma NFPA 484 señala en su capítulo 14 Nanometales en polvo, las recomendaciones para su utilización en la industria y para la seguridad de los trabajadores que los manipulan. Establece los requisitos de seguridad para procesos que emplean nanomateriales en polvo como son procesos de producción basados en plasma, procesos bioquímicos o pirólisis por spray térmico.

En el capítulo 15 Fabricación Aditiva de la norma NFPA 484 señala que se debe realizar un análisis de riesgos de polvos DHA y establece lineamientos para gestionar el polvo generado en procesos de fabricación como la impresión en cama de polvo, impresión con spray de polvo, además de señalar las medidas cuando se manipulan materias primas en polvo. Esto es esencial especialmente cuando se utilizan varios tipos de metales en polvo en la misma impresora, y para evitar la contaminación cruzada que puede ser potencialmente explosiva,

la norma previene la situación indicando que debe realizarse una limpieza profunda del equipo, además de evitar el contacto entre los diferentes metales o el colector de polvo.

La ubicación de los lugares para ejecutar los procesos de fabricación aditiva también debe satisfacer las condiciones de seguridad. En la normativa NFPA 1 Código de Incendios en su edición 2021, incluye el capítulo 46. Fabricación Aditiva (Impresión 3D) dos grupos de exigencias para la fabricación aditiva: fabricación aditiva industrial y fabricación aditiva no industrial (Ziavras, 2022). Adicionalmente de mencionar a normas como la NFPA 484, se trabaja conjuntamente con al NFPA 70 Código Nacional Eléctrico debido a la seguridad que deben presentar las instalaciones eléctricas que trabajan con polvos combustibles.

### **Fabricación aditiva no industrial**

Para que sea considerada una fabricación aditiva no industrial debe cumplir con todos los siguientes requisitos:

- No emplea gas inerte.
- No posee recolección de polvo combustible.
- No es necesario establecer un área con clasificación eléctrica peligrosa aparte del equipo.
- Solamente utiliza filamentos de material plástico listado por las impresoras 3D.

### **Fabricación Aditiva Industrial**

Para ser considerada como fabricación aditiva industrial basta con cumplir con una de las características siguientes:

- Utilizar suministro de gas inerte.
- Utilizar metales o polvos combustibles.
- Poseer un sistema de recolección de polvos combustibles.
- Establece un área de clasificación peligrosa eléctrica aparte del equipo.

En ambos casos, la norma solicita que los equipos empleados sean listados UL. La fabricación aditiva no industrial puede estar ubicada en cualquier tipo de ocupación sin restricciones. La fabricación aditiva industrial solamente está permitida en los grupos de ocupación asociados con las operaciones de fabricación y según lo permitan las cantidades máximas en la NFPA 400 Código de Materiales Peligroso. Los riesgos de incendio y explosión ligados al aditivo industrial en la fabricación, está más alineados con los peligros que vería en un entorno de fabricación

tradicional. Sin embargo, en la fabricación aditiva no industrial muchos de esos peligros similares no se encontrarán debido a que las operaciones son distintas. Por lo tanto, esas operaciones están permitidas en una gama más amplia de destinos (Ziavras, 2022).

### **Polvos de impresión**

Los polvos empleados para la fabricación de aditivos industriales deben ser probados en cuanto a su combustibilidad según lo establecido en la NFPA 484, Norma para Metales Combustibles o NFPA 652, Norma sobre los Fundamentos del Polvo Combustible. Si se emplea un polvo combustible no metálico debe remitirse al Capítulo 40 de la NFPA 1 y la NFPA 654 Norma para la Prevención de Incendios y Explosiones de Polvo de la Fabricación, Procesamiento y Manejo de Partículas Sólidas Combustibles.

### **Detección de gas**

En la fabricación aditiva industrial, que utiliza gases inertes, la ocupación debe poseer un mecanismo para la detección de gas en todas las áreas donde se emplee o donde la autoridad competente lo solicite. El sistema de detección debe activar alarmas visuales y audibles, y cortar inmediatamente el flujo de gas inerte.

### **Imprimiendo Edificios**

En estos días, las impresiones 3D se están empleando para construir edificios de oficinas, hogares y otras construcciones de tamaño estándar, que son totalmente funcionales. A medida que la industria se expande rápidamente, se requieren políticas para asegurar que esas estructuras resulten sólidas ante un incendio. (Verzoni, 2018).

**Figura 15.** Pared fabricada con impresión 3D.



Fuente: NFPA, 2022

Algunos visionarios predicen que los edificios 3D pueden ser empleados en el espacio exterior y son la respuesta para que el ser humano pueda vivir fuera de la tierra. Existen empresas que han recibido apoyo económico por parte de la NASA para sus trabajos sobre estos tipos de proyectos. La NASA adjudicó Al SpaceFactory, una empresa de diseño y arquitectura con sede en la ciudad de Nueva York, un valor de 500.000 USD para diseñar un hogar que se pueda ser impreso por los astronautas cuando lleguen a Marte. La construcción emplearía materiales provenientes de roca marciana, con esto se elimina la realidad de enviar materiales desde la Tierra ubicada a una distancia de 140 millones de millas.

A nivel normativo, la UL posee normativa para la Prueba de Características de Combustión de Superficies de Materiales de Construcción, que puede ser empleada para comprobar la resistencia al fuego de las paredes generadas mediante impresión 3D.

En cuanto a normativa europea, se ha establecido la norma UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020 *Fabricación aditiva. Diseño. Requisitos, directrices y recomendaciones* (ISO/ASTM 52910:2018). Esta normativa ha sido elaborada en conjunto con la ISO/TC 261 *Additive Manufacturing* y ASTM F42 *Additive Manufacturing Technologies*. Esta normativa establece las pautas, requisitos y advertencias para emplear la impresión 3D o la tecnología de fabricación aditiva en la elaboración de toda clase de piezas, componentes, productos, dispositivos o sistemas.

## 2.6. Sistemas de prevención de incendios 4.0

A continuación, se describen las tecnologías de Industria 4.0 empleadas en los sistemas de prevención de incendios, en la inspección, pruebas y funcionamiento de los sistemas, combate de incendios y entrenamiento de bomberos.

### 2.6.1. Realidad Virtual y Realidad Aumentada

La realidad virtual y la realidad aumentada se está empleando en la industria para poder realizar capacitaciones del personal en entornos que pueden ser configurados de acuerdo a la necesidad. En el campo militar, el ejército de los Estados Unidos anunció en marzo de 2021 que solicitaría a Microsoft, doce mil gafas de realidad aumentada para el entrenamiento en batalla de sus soldados.

En el ámbito del personal del Cuerpo de Bomberos, la RA y RV complementan la capacitación y entrenamiento al ofrecer un sinnúmero de posibles escenarios de siniestros como son:

incendios en sitios confinados, incendios en vehículos o derrames de líquidos combustibles, etc. Pero la RV y RA no es tecnología no cara.

Aunque la muerte de bomberos en entrenamiento no es común, de acuerdo a un informe de la NFPA, entre 1977 y 2018 se el promedio anual de descensos del personal bomberil al año en los Estados Unidos fue de 9. De acuerdo a este informe, “*el entrenamiento es parte vital de las operaciones de cuerpos de bomberos, pero con demasiada frecuencia resulta en muertes y lesiones innecesarias*”.

**Figura 16.** Módulo de entrenamiento creado por FLAIM Systems.



Fuente: Verzoni, 2022.

Este tipo de entrenamiento se denomina aprendizaje inmersivo y sus estudiantes utilizan gafas y auriculares que representan un escenario real de manera virtual. En el entrenamiento de personal del cuerpo de bomberos, se puede mitigar las pérdidas económicas de los incidentes ocasionados por el adiestramiento. El riesgo de adquirir cáncer se reduce al evitar estar en contacto con material tóxico como son las espumas en incendios de hidrocarburos.

Existen empresas especializadas en equipo de realidad virtual y aumentada como FLAIM, que tiene productos como el Trainer y el Extinguisher que utiliza un visor de realidad virtual, chaleco térmico, aparato de respiración autónomo, sensores para monitorear la frecuencia respiratoria, e implementos como una manguera y boquilla que se comportan como las mangueras reales.

#### 2.6.2. Análisis de datos de incendios

En todo el planeta suceden incendios de varios tipos y con diferentes consecuencias, desde

incendios forestales a incendios estructurales. Sin embargo, pocos son los países que reúnen o procesan los datos e información detallada de los incendios ocurridos, mientras que otros países no ponen a disposición fácilmente los datos que almacenan.

Las aseguradoras poseen información de los eventos de incendios, sin embargo, las definiciones que emplean pueden variar de una empresa a otra y pueden no significar lo mismo. (Bliss, 2016).

Sin datos precisos de los incendios que ocurren, los gobierno y las autoridades competentes no pueden generar planes de prevención de incendios a los ciudadanos, centrar sus esfuerzos en la educación pública o en la generación de normas o códigos. Esto genera la incertidumbre de cuanto presupuestar para un combate de incendios eficaz. Generalmente, debe ocurrir un evento con grandes pérdidas humanas o materiales para que se trate de generar normativa o campañas de educación en prevención de incendios. Tal es caso de los eventos descritos en el capítulo anterior o eventos generados a propósito por la mano del hombre.

De acuerdo a lo señalado por Bliss, los datos que se obtienen de los incendios que ocurren en el mundo, ofrecen una visión de cómo las muertes por incendios se relacionan con el crecimiento demográfico, la economía de la región, la manera de responder de los cuerpos de bomberos locales y la manera en que reacciona la comunidad. Esta relación que se establece, es fundamental en los países en los cuales las precarias condiciones de control en el establecimiento de invasiones, viviendas hechas con material altamente combustible, el no obedecer los códigos de construcción traen como consecuencia que el suministro del agua para los sistemas de supresión de incendios no se cumpla y se generen grandes pérdidas humanas y materiales.

De acuerdo con Rick Stoll en su artículo publicado “Los líderes del servicio de bomberos hablan de datos en el taller de NFPA”, es muy valiosos el saber que el 60% de los incendios ocurren en las cocinas, por lo que la NFPA escogió este tema en la Semana de la Prevención de Incendios del año 2013, sin embargo, estos resultados del análisis de datos serían más valiosos al enfocarse en la realidad de cada jurisdicción, para que los cuerpos de bomberos puedan hacer énfasis en las capacitaciones a la ciudadanía en extinción de incendios en cocinas.

Stoll también sugiere que hay que enfocarse en ayudar a la toma de datos de incendios tomando en cuenta los siguientes puntos clave:

- Incentivar la participación. Se puede incentivar la participación de los cuerpos de

bomberos ofreciendo el data analysis gratis o el equipamiento y entrenamiento para el análisis de sus datos.

- Facilitar el ingreso de datos. Después de una jornada dura de lucha contra incendios, a altas horas de la madrugada, los bomberos no desean pasar más de una hora documentando la información del incendio.
- Educar a los usuarios. El capacitar a los captadores de datos agiliza el proceso de ingreso de datos y mejora su calidad.
- Rendir cuentas. Los cuerpos de bomberos deben rendir cuentas anualmente y se debe evaluar la calidad de los datos ingresados.

Finalmente, tener mejores datos conducirá a mejorar su análisis. Un mejor análisis conducirá a una toma de decisiones informada. Y esto a su vez, ayudará a reducir el problema de incendios de cada país.

Un ejemplo de cómo se puede emplear el análisis de datos es el Sistema de Inspecciones Basado en Riesgos del Cuerpo de Bomberos de Nueva York (RBIS). En este sistema aportan 17 agencias distintas de la ciudad. Estas agencias aportan con grandes cantidades de datos referentes a edificios y el vecindario en el que desempeñan sus actividades debido a que son conocedores de su ambiente. Esta información es luego analizada por FireCast 3.0.

FireCast 3.0 es un algoritmo especialmente desarrollado por la Unidad de Análisis del Cuerpo de Bomberos de la Ciudad de Nueva York (FDNY). Este algoritmo genera un puntaje de riesgo de incendio para todos los edificios inspeccionados por el FDNY, adicionalmente genera un programa de priorización diaria de inspecciones de edificios que es distribuido a todas las compañías de bomberos de la ciudad de Nueva York. Los bomberos llevan a cabo las inspecciones y hacen referencia a los potenciales riesgos de incendios y recopilan la información relevante para la realimentación en el ciclo RBIS/FireCast. (Rieland, 2015)

El algoritmo de FireCast se fundamenta en una especificación básica:

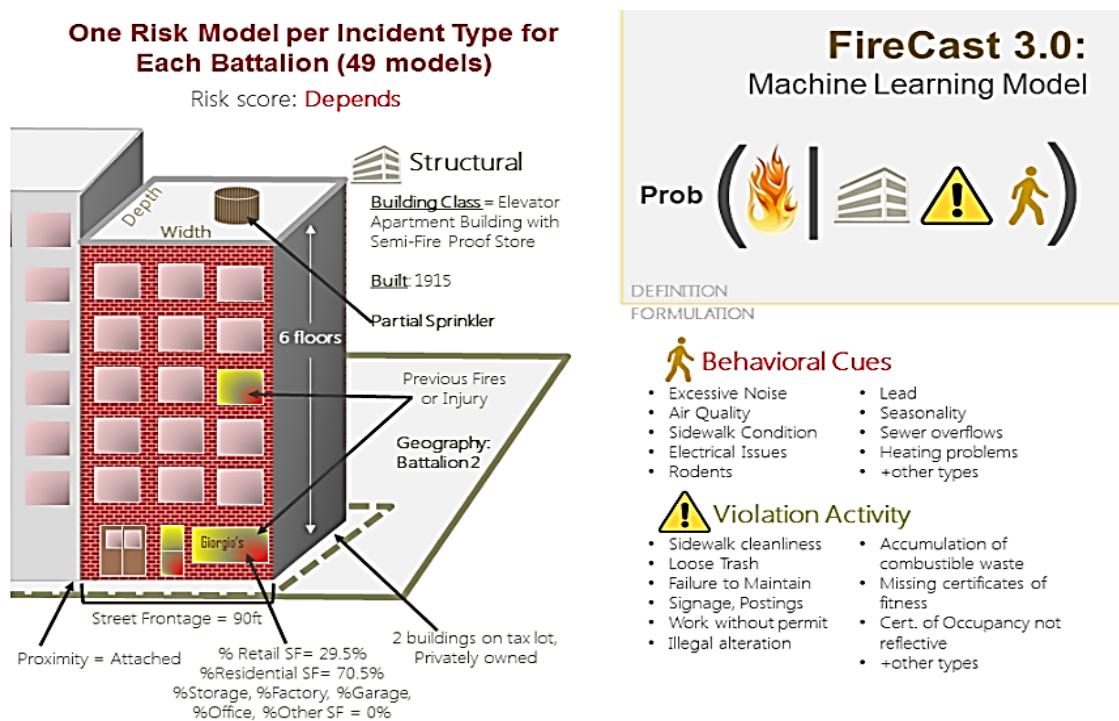
*Probabilidad (Fuego) = función (actividad humana, características del edificio, violación a ley)*

Se analizan hasta 7.500 factores de riesgo que pueden alertar de la posibilidad de incendio en una edificación. Se consideran factores de tipo estructural hasta si la edificación se encuentra asegurada o si ha recibido una multa por basura acumulada. Se podría pensar que este tipo

de factores no se relacionan con un incendio, sin embargo, son de importancia cuando existe la posibilidad de que se genere un incendio accidental o premeditadamente.

Finalmente, se podría considerar que los incendios son totalmente aleatorios, sin embargo, el fuego de que ocurren y de culminar con una investigación de incendios metodológicamente llevada de acuerdo a la NFPA 921. Guía para investigación de incendios y explosiones, se pueden obtener características que son precursoras de un incendio como son actividades o comportamientos humanos, violaciones a la ley, y características del edificio u ocupación. Cada modelo de probabilidad de fuego es adaptado geográficamente a cada uno de los 47 batallones de bomberos de la ciudad de Nueva York.

**Figura 17.** Fire Cast 3.0: Modelo de Machine Learning



Fuente: Chen, 2018.

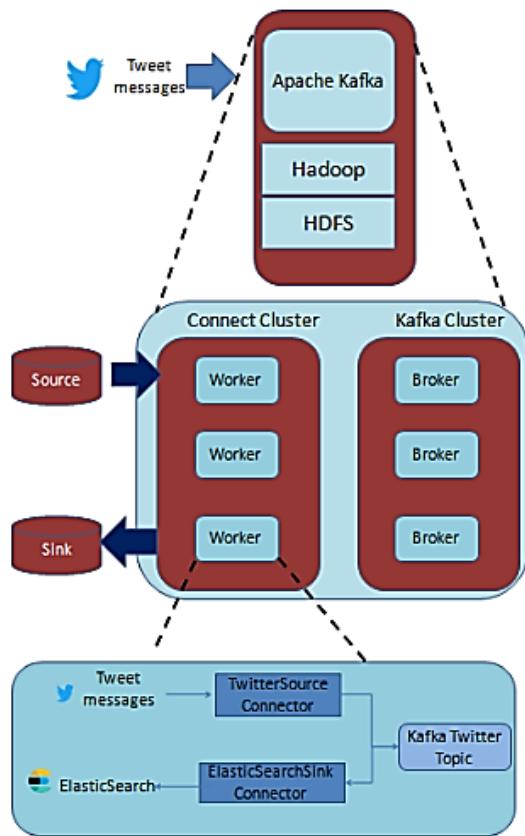
### 2.6.3. Big Data e incendios forestales

En los últimos años, se ha observado un aumento de las hectáreas de bosques consumidas por el fuego (FAO y PNUMA, 2020), por lo que han surgido estudios con la finalidad de establecer arquitecturas que ayuden a manejar la gran cantidad de datos obtenidos de sensores, imágenes satelitales, fotos y reportes en sitio, y permitan mejorar la gestión de los recursos antes y durante un incendio forestal.

Una arquitectura propuesta en el año 2018 por Athanasis et al. se relaciona con el manejo de

desastres naturales, y trata de integrar el modelado de los sistemas de información geográfica (SIG) con la información en tiempo real de la red social Twitter.

**Figura 18.** Propuesta de arquitectura de Big Data para la administración de incendios forestales.



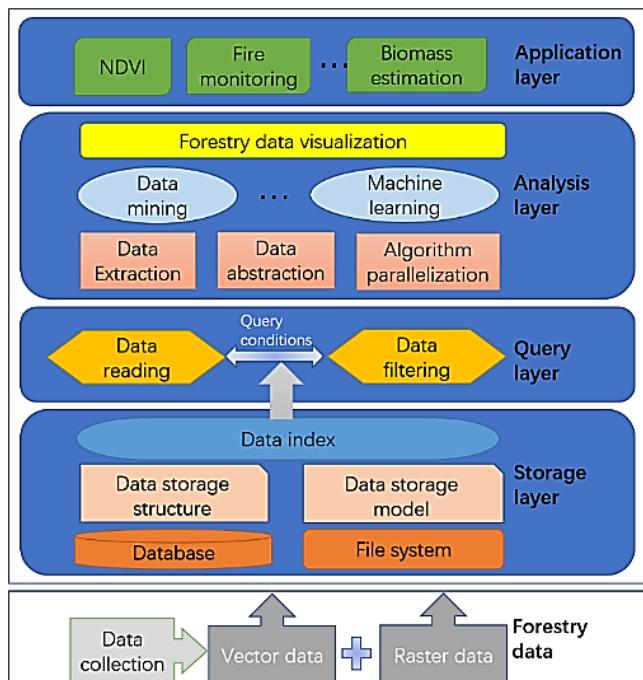
Fuente: Athhanasis et al., 2018.

Adicionalmente, en el año 2019 Zou et al. propone una arquitectura de Big Data general que se puede emplear para apoyar la toma de decisiones en el caso de incendios forestales. Se toma como fuente de datos a las redes sociales, al IoT, sensores remotos, encuestas y datos asociados a la localización.

En este modelo se proponen cinco capas de big data forestal: adquisición, almacenamiento, consulta, análisis, visualización, y aplicación de datos.

Analizando los datos obtenidos se pueden establecer tiempos de quema programada y controlada del bosque para poder aprovechar la tierra para agricultura.

**Figura 19.** Plataforma de dirección para big data forestal.



Fuente: Zou et al., 2019.

#### 2.6.4. Fabricación aditiva en prevención de incendios

Al hablar de incendios hay que tener en cuenta que un incendio puede darse sobre cuando se poseen los 3 elementos del triángulo de fuego: material combustible, oxígeno y fuente de calor. Si en un ambiente determinado, no existe uno de estos elementos, no puede haber un incendio.

**Figura 20.** Triángulo del fuego.



Fuente: NFPA., 2019.

Para evitar posibles fuentes de ignición en la fabricación aditiva no industrial, algunos fabricantes de filamentos de plásticos están incorporando recubrimientos para evitar la

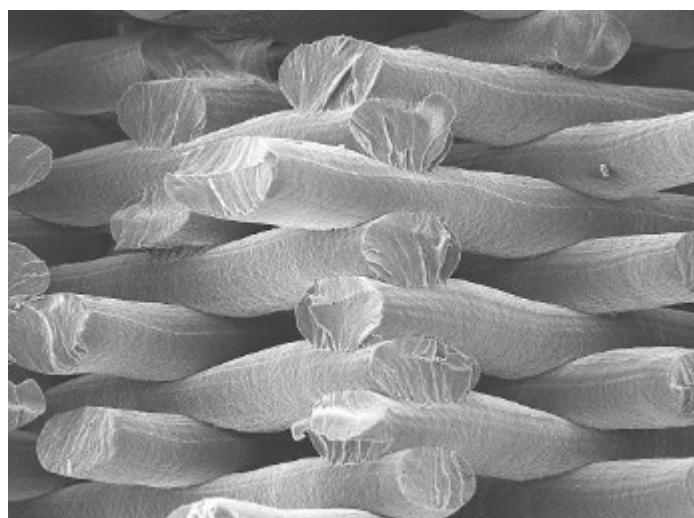
generación de descargas electrostáticas y que puedan generar un incendio debido al constante rozamiento entre el filamento y las partes de la impresora.

Al fabricar con polímeros, la forma tradicional de dar forma a los materiales es mediante extrusión o moldeo en caliente, sin embargo, con la impresión 3D, las formas que se pueden obtener son infinitas. Una técnica de impresión 3D en materiales plásticos es la deposición fundida FDM. Para esto se pueden emplear filamentos de material polimérico o se puede alimentar directamente la boquilla de la impresión con gránulos (chips) de polímeros.

Según los estudios realizados por Geoffroy et al. en el año 2019 comparando dos placas de material polimérico: uno impreso en 3D y otro obtenido por la manera tradicional de termocompresión, concluyó que luego de un análisis microscópico y utilizando una microonda electrónica, las placas impresas en 3D tienen una densidad más baja y una porosidad más alta que las placas termocomprimidas.

Se evaluaron las propiedades ignífugas de las dos placas mediante la prueba de calorímetro de pérdida de masa a  $50 \text{ kW/m}^2$ , obteniendo como resultado que las placas de impresión 3D se pueden emplear para producir sistemas ignífugos.

**Figura 21.** Micrografía electrónica de barrido de impresión 3D de polímero.



Fuente: Guamantario, 2018.

La fabricación aditiva está demostrando su fortaleza al producir piezas de repuesto que cumplen la norma europea EN45545, debido a que los componentes de vehículos ferroviarios están sujetos a requisitos especiales en cuanto a densidad de humo y el índice de oxígeno. Generalmente, cuando un material polimérico se quema, libera gran cantidad de humo y

gases tóxicos que, para el caso de un ferrocarril, puede resultar fatal si el producto de la combustión de acumula en un vagón con personas dentro.

## 2.7. Comparación entre sistemas de prevención de incendios tradicional y el sistema de prevención que emplea tecnologías de Industria 4.0

En este capítulo se va a comparar los sistemas de prevención de incendios tradicional y de Industria 4.0 con la finalidad de conocer las ventajas o desventajas, limitaciones o alcances que ofrecen las nuevas tecnologías.

### 2.7.1. Entrenamiento de bomberos

Los expertos creen que el aprendizaje inmersivo tendrá un papel muy relevante en el futuro del entrenamiento de los bomberos debido a los beneficios que tiene la tecnología para mantener seguros a los bomberos y el medio ambiente menos contaminado. (Verzoni, 2022). Aparte de los fallecimientos de personal bomberil en entrenamiento, en el año 2019 más de 8.100 bomberos fueron lesionados en el entrenamiento. La mayoría de estas lesiones fueron distensiones o esguinces, quemaduras, inhalación de gases y humos, y agotamiento por calor. De acuerdo a Verzoni, la ventaja de emplear el aprendizaje inmersivo, es que las lesiones ocasionadas en los entrenamientos de los bomberos, puede eliminarse al completar el adiestramiento con llamas reales con entrenamiento de RV o RA. *“Este es un gran paso hacia adelante en la salud y seguridad ocupacionales”*, dijo Godfredson y agregó que impedir la exposición de los caballeros del fuego al ambiente cancerígeno del entrenamiento con llamas real también puede menorar el riesgo de cáncer ocasionado por su trabajo.

La US Fire Administration en un boletín publicado en 2020 determinó: *“la tecnología de realidad virtual está elevando el nivel en el entrenamiento de los bomberos mientras ayuda a salvar vidas y conservar recursos valiosos. El uso de la tecnología de realidad virtual permite el entrenamiento para incidentes que no se pueden replicar fácilmente o que pueden ser muy costosos de recrear, sin mencionar la eliminación de los peligros involucrados en el entrenamiento en vivo”*.

El emplear este tipo de tecnologías ayuda a conservar recursos valiosos en un mundo muy comprometido con el ambiente. Las instalaciones de entrenamiento con fuego real son consumidoras de gran cantidad de agua y emisoras de gases, humos y productos de la combustión.

**Figura 22.** Herramientas de entrenamiento de realidad virtual.



Fuente: Verzoni, 2022.

Adicionalmente, en algunas instalaciones como los aeropuertos según un estudio realizado por el Journal of Environmental Management, el 7% de los aeropuertos de Canadá están intoxicados con PFAS (perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas) que son sustancias relacionadas con algunos tipos de cáncer y son empleadas por los bomberos aeroportuarios en sus entrenamientos.

En normas como la NFPA 1000 y NFPA 1400, en las secciones que se refieren al adiestramiento y las aptitudes técnicas de los bomberos, hay varias referencias al entrenamiento con fuego real o llamas vivas, por lo que, si las personas no ven que la NFPA ratifica el aprendizaje inmersivo, no lo van a usar.

Adicionalmente al entrenamiento de bomberos, las tecnologías de RV y RA pueden emplearse en incentivar la cultura de prevención de incendios en la comunidad y también en el reclutamiento de nuevos bomberos.

Las tecnologías de realidad virtual y aumentada pueden ser muy útiles en cuerpos de bomberos de recursos limitados y que no pueden acceder a infraestructuras de entrenamiento reales. Los retos de entrenamiento pueden ser tan variados como sean sus necesidades de capacitación.

**Figura 23.** Enseñanza de prevención de incendios

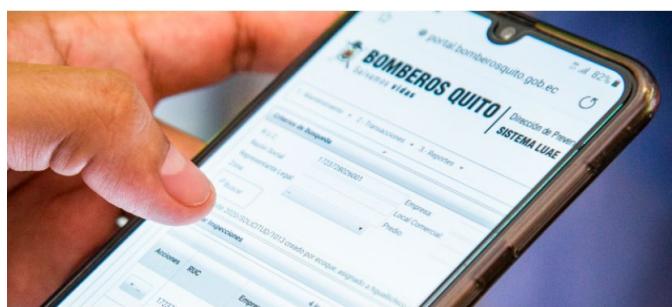


Fuente: Verzoni, 2022.

#### 2.7.2. Análisis de datos de incendios

Para la comparación con las inspecciones de prevención de incendios que se hacen comúnmente en la ciudad de Quito - Ecuador, por el Cuerpo de Bomberos de Quito, se aprecia que las inspecciones a los edificios se realizan en función de las solicitudes de los usuarios para obtener la Licencia Única de Actividades Económicas – LUAE. La solicitud para la inspección de prevención de incendios se agenda en la bandeja del inspector de la zona y acude en el menor tiempo posible.

**Figura 24.** Inspección de incendios



Fuente: Bomberos Quito, 2022.

Si el establecimiento no cumple con los requisitos de aprobación, se programa una reinspección para una fecha posterior. Si el establecimiento no cumple los requisitos en materia de prevención de incendios, se notifica el incumplimiento a la Agencia Metropolitana de Control para que comience el proceso sancionador que puede culminar con el cierre del

establecimiento. El Cuerpo de Bomberos de Quito posee la Unidad de Investigación de Incendios para determinar el área de origen y posible causa de los incendios que se produzcan en el Distrito Metropolitano de Quito con el fin de generar estadísticas que permitan tomar decisiones para la Gestión de Prevención de Incendios. (Bomberos Quito, 2022). Sin embargo, los datos no son abiertos (open data), siendo necesaria la solicitud mediante oficio a la máxima autoridad para acceder a los resultados o estadísticas de sus investigaciones. Tampoco poseen un sistema de predicción de incendios en base a las inspecciones anteriores, eventos de incendios históricos, clasificación del riesgo o características de las ocupaciones, sin embargo, la deficiencia en estos sistemas de procesamiento de datos no disminuye a entrega de los inspectores de prevención de incendios quienes trabajan recorriendo a pie los locales, industrias y edificios a lo ancho y largo de la ciudad de Quito.

#### 2.7.3. Fabricación Aditiva

Contrario a lo que se puede llegar a creer, cuando una edificación está en construcción, es decir fabricando su estructura, implementando sus pilotes o elaborando sus columnas y mampostería, también es susceptible de incendios. Esto puede parecer contradictorio debido a que la idea de un incendio es la combustión de grandes cantidades de materiales como papel, decoraciones u otros materiales utilizados por las personas. Sin embargo, la posibilidad de tener un incendio en construcciones es alta debido que se emplean:

- Gases combustibles para cortar las estructuras metálicas.
- Arco eléctrico para soldar componentes metálicos como son vigas, columnas o refuerzos.
- Materiales reciclados como madera, caucho o plástico como parte de la estructura del edificio.

Anticipando las medidas de seguridad en la construcción o demolición de edificios, la NFPA pone a disposición la NFPA 241 Norma para la Protección de Operaciones de Construcción, Alteración y Demolición que establece los criterios necesarios para mantener las obras de construcción con bajo riesgo de incendios.

De manera local, las entidades de control municipales no ejercen un cuidado en las medidas de protección de incendios en edificios en construcción, su papel gira en torno al control documental de permisos para realizar las construcciones. Tampoco en los últimos años han

existido casos de edificios en construcción consumidos por las llamas, pero si de accidentes laborales y muertes por caídas de altura, elevadores de construcción que fallaron o por electrocución al tocar el obrero las líneas de transmisión de electricidad.

La tecnología de fabricación aditiva ha pasado de imprimir objetos pequeños conectados al computador de casa a imprimir en obra componentes importantes como mampostería o estructura de las casas o edificios. Actualmente, la NFPA en conjunto con Underwrithes Laboratories UL están colaborando para poder asegurar la protección contra incendios en estructuras fabricada a partir de la impresión en 3D. Concretamente, están colaborando en la elaboración de normativa como la UL 3401 que servirá de apoyo para la evaluación de este proceso de construcción.

**Figura 25.** Primera casa levantada en España con impresión 3D.



Fuente: <https://www.expreso.ec/actualidad/economia/impresion-3d-llega-construccion-527.html>, 2022.

La impresión 3D de partes de edificios sigue avanzando con la finalidad de realizar formas más complejas que los arquitectos diseñan y poder reducir los costos en tiempo y materiales para la edificación. Es tal la reducción del tiempo y recursos humanos en este tipo de construcción, que el tiempo de elaboración de la vivienda mostrada en la figura 25 demoró 12 horas en fabricar y solicitó la ayuda de 3 operarios.

En si los materiales utilizados en impresión de edificios no son combustibles debido a que emplean hormigón y fibras que no representan un peligro de incendio, sin embargo, el trasladar al campo los equipos eléctricos, electrónicos y materiales adicionales puede conllevar un riesgo de incendio al estar sujeto a condiciones ambientales variables y a

conexiones eléctricas que pueden ser un punto de ignición si no son realizadas y mantenidas de conformidad a lo que requiere la normativa vigente.

## 2.8. Conclusiones sobre el estado del arte

Una vez revisados varios proyectos y documentos de investigación relacionados con el tema del TFM, se llega a las siguientes conclusiones.

Los sistemas activos de prevención de incendios corresponden a aquellos sistemas que entrarán en funcionamiento una vez iniciado el incendio.

Estos sistemas deben ser lo suficiente fiables para que, en el único momento de inicio del incendio, puedan identificar claramente que el evento que se está desarrollando es un incendio y se activen inmediatamente notificación y supresión del fuego.

Los incendios van a seguir ocurriendo como una consecuencia de las actividades del ser humano, sea en el hogar, las industrias o en la naturaleza, por lo que se ve la necesidad de hacer uso de la Industria 4.0 con la finalidad de tener sistemas de prevención de incendios totalmente fiables.

Debido a que un sistema de extinción de incendios trabajará alguna vez, en algún momento tiempo desde su instalación hasta el momento que ocurra el incendio, es necesario mantener su operatividad al 100% y que funcione hasta que termine su vida útil, si es posible, combatiendo el incendio y brindando una oportunidad de vida y escape a las personas dentro de la edificación.

Las tecnologías involucradas en la Industria 4.0 están abarcando cada vez más áreas y la prevención de incendios no es una excepción. Es por esto que, la incorporación de estas tecnologías mejorará la percepción de los sistemas de prevención de incendios como inversiones y no como un gasto, o como un requisito que hay que cumplir para obtener un permiso de funcionamiento.

En países de Latinoamérica, se han producido grandes incendios que han ocasionado centenas de víctimas y cuantiosos daños a la infraestructura, con este TFM se espera poder encontrar la manera de apalancar la lucha contra incendios, abordando la utilización de nuevas tecnologías, como estas mejoran las respuestas de los sistemas de prevención de incendios, sus beneficios y contras para la implementación en los varios tipos de ocupaciones.

### 3. Descripción general de la contribución del TFE

#### 3.1. Objetivos

##### **Objetivo general**

Investigar la aplicación de las tecnologías de Industria 4.0 en los sistemas de prevención de incendios.

##### **Objetivos específicos**

- ▶ Determinar las causas de los incendios más significativos a nivel mundial y el rol que tuvieron los sistemas de prevención de incendios convencionales.
- ▶ Establecer las mejoras en la operación de los dispositivos para prevenir incendios con tecnologías de Industria 4.0.
- ▶ Comparar las ventajas de aplicar las tecnologías de Industria 4.0 respecto a las soluciones convencionales.

#### 3.2. Metodología del trabajo

Para el presente proyecto de investigación se elige utilizar una planificación secuencial que permita alcanzar los objetivos planteados. La metodología se indica en los siguientes párrafos:

1. Revisión bibliográfica asociada al tema de investigación.
2. Estudio de casos de incendios a nivel local, regional y mundial.
3. Determinación del problema de investigación, objetivos y alcance.
4. Identificación de tecnologías de Industria 4.0 en los dispositivos de prevención de incendios.
5. Descripción de normativa en materia de prevención de incendios aplicable a tecnologías de Industria 4.0.
6. Comparación de los beneficios y dificultades de aplicar las tecnologías de Industria 4.0 respecto a las tecnologías convencionales.
7. Redacción de documento final.

#### 3.3. Descripción general de las partes o componentes de la propuesta

El trabajo de fin de master consiste en elaborar un documento de investigación en el cual se pueda poder de manifiesto los beneficios y limitaciones de la implementación de tecnologías

de Industria 4.0 como son: ciberseguridad, fabricación aditiva, big data, robótica, simulación, internet de las cosas en los sistemas de prevención de incendios, para reducir la muerte de vidas humanas y pérdidas materiales.

Se va a realizar la comparación de entre los sistemas de prevención de incendios convencionales en contra de los sistemas de prevención de incendios con tecnologías de Industria 4.0.

### **Alcance y limitaciones**

El alcance del presente TFM son los sistemas de prevención de incendios para ocupaciones residenciales, comerciales e industriales. Esto incluye a los siguientes sistemas:

- ▶ Sistemas de notificación y alarmas de incendios.
- ▶ Sistemas de supresión de incendios.
- ▶ Sistemas de protección pasiva.

Adicionalmente, se incluyen elementos empleados por el personal de combate de incendios y para hacer las inspecciones técnicas de las ocupaciones.

### **Tecnologías implicadas**

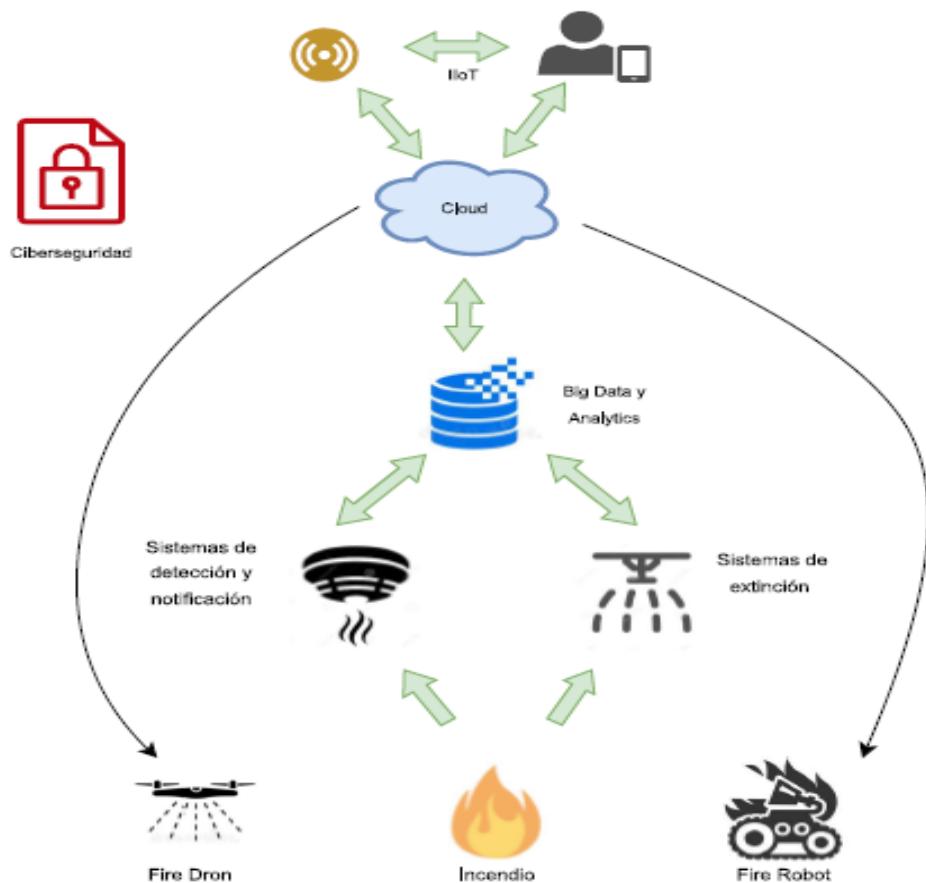
Para esta propuesta de TFM se ha considerado como tecnologías implicadas a las siguientes: Big data, fabricación aditiva, IoT, Ciberseguridad, robótica, sistemas integrados.

### **Arquitectura, componentes e integración de tecnologías.**

La arquitectura y sus componentes va a depender mucho del tipo de sistemas de prevención de incendios que se analice. En el caso de los sistemas de detección de incendios, se emplean tecnologías IoT, de ciberseguridad, Big Data. Mientras que en sistemas de extinción la tecnología puede incluir la fabricación aditiva mejorando la resistencia al fuego de los materiales o la robótica con autómatas que pueden ser drones o robots que colaboran en las acciones de extinción de incendios.

Las tecnologías de Industria 4.0 para los sistemas de prevención de incendios se integran según se indica en la siguiente figura.

**Figura 26.** Arquitectura e integración de tecnologías.



Fuente: Elaboración propia.

## Resultados esperados

Con la presentación de este TFM se espera aportar a que se incrementen las tecnologías de la industria 4.0 En los sistemas de prevención de incendios, mostrando sus beneficios en comparación con los sistemas tradicionales de prevención de incendios. La tecnología ha aumentado e incursionado en varias industrias, por lo que los sistemas de prevención de incendios no pueden ser la excepción.

También se espera presentar este documento como un aporte a la investigación de sistemas modernos de prevención de incendios en revistas científicas o congresos relacionados con las tecnologías de Industria 4.0.

## Planificación general

La tabla 2 muestra el diagrama de Gantt de las actividades incluidas en la planificación para la elaboración del presente documento.

**Tabla 2. Diagrama de Gantt de las actividades planificadas.**

Actividad	PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES											
	Semana											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Programación de la propuesta.	■											
Ajuste del contenido de los capítulos.		■										
Búsqueda bibliográfica de tecnologías de Industria 4.0 aplicadas a sistemas de prevención de incendios.			■	■	■	■						
Ánalysis normativo de los sistemas de prevención de incendios con tecnologías de Industria 4.0.					■	■	■					
Comparación entre tecnología tradicional y tecnologías 4.0.								■	■			
Estructuración de la información en contrada.					■	■	■					
Redacción de la memoria del TFM.								■	■			

Fuente: Elaboración propia, 2022.

## 4. Desarrollo específico de la contribución

En este capítulo se va a proponer una solución para mejorar la prevención de incendios y reducir el número de pérdidas humanas en lugares de concentración masiva. Como se observó en el estado del arte, varias de las peores tragedias ocurrieron en lugares muy concurridos y donde las salidas de emergencia no se podían localizar bien, es por este motivo que se plantea la siguiente propuesta que es el contar con mapas de riesgos, recursos y evacuación que no se encuentren ubicados en la pared del establecimiento, sino que puedan estar literalmente en la mano del cliente utilizando una aplicación que lo guie a la salida de emergencia más cercana en la ruta más corta y sin peligro.

En esta propuesta se describe claramente el problema, se establece como combatirlo, se hace la propuesta de arquitectura y los elementos que la componen, y finalmente se presenta un presupuesto.

Para ubicar a los dispositivos inteligentes es común el emplear el GPS. Hoy en día nadie duda de su ayuda en espacios abiertos o donde existe línea recta de visualización desde el satélite hasta los dispositivos, sin embargo, si se desea conocer la ubicación de un dispositivo mediante GPS en el interior de edificios, se dificulta localizar el objetivo debido a que la señal pierde intensidad o se pierde totalmente.

Adicionalmente, el utilizar constantemente la tecnología GPS tiene un costo muy alto en consumo de energía, es decir, el utilizar el GPS en el teléfono celular por ejemplo haría que la batería dure aproximadamente 2 horas. El consumo tan significativo de energía se debe, entre otras razones, a que el dispositivo debe recibir la información de al menos 3 satélites, siendo lo óptimo de 4 a 30 señales de GPS y luego esta señal debe ser procesada. El emplear el GPS, en definitiva, demanda gran cantidad de energía del dispositivo móvil sea por las condiciones climáticas, condiciones de nubosidad o visibilidad, y finalmente, no es posible utilizar la localización por GPS dentro de los edificios.

### 4.1. Mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligentes

La normativa actual en el Distrito Metropolitano de Quito, señala en su RTQ1. Prevención de Incendios: Reglas técnicas básicas, que las ocupaciones que posean más de 200 metros cuadrados y oficinas que cuenten con más de 50 personas, deben poseer planes de

emergencia que incluyan procedimientos de evacuación y medidas de actuación en caso de que se produzca un incendio. En este sentido, en la RTQ 5. Medios de Egreso, se señala que las ocupaciones que lo requieran deben exhibir en sitios visibles, mapas de evacuación que reflejen de manera clara, la forma en que se distribuye el edificio, donde se ubican las salidas y el acceso a dichas salidas desde el punto donde se encuentra el observador del mapa.

De manera realista, en la gran mayoría de los casos, el ocupante y sobre todo el visitante a una edificación, no pierde el tiempo visualizando los mapas de riesgos, recursos o evacuación que posea el edificio, sino que a lo mucho presta atención a las señales de salida.

Es por esta razón que se propone una solución a esta situación y es el de proveer de una aplicación al visitante de una edificación, como una fábrica o sitio de riesgo, donde se indique en tiempo real su ubicación y la ruta de acceso a las salidas de emergencia más cercanas. Aunque no es alcance de este TFM, en lo posterior se puede incluir la ubicación de los agentes como extintores o conexiones de mangueras contra incendios y, finalmente, se señale claramente las zonas de mayor riesgo de incendios dentro de la edificación.

#### 4.2. Variables a monitorizar en los mapas de riesgos, recursos y evacuación

En el estado del arte se describieron algunos casos reales de incendios en ocupaciones con centenares de pérdidas humanas. Se pudo observar que, aparte de que algunas salidas de emergencia estuvieron bloqueadas intencional e inintencionalmente, luego de las investigaciones la gente confundió las señales de salidas o simplemente no sabía hacia donde evacuar.

**Tabla 3. Tipos de mapas en un plan de emergencia.**

Tipo de mapa	Representación	Finalidad
Riesgos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zonas con riesgos de incendios</li><li>• Zonas de riesgo eléctrico</li><li>• Zonas de almacenamiento de materiales combustibles</li></ul>	Informar al visitante que zonas son peligrosas y debe evitar ingresar o acercarse en caso de incendio.
Recursos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ubicación de extintores</li><li>• Sitio de los gabinetes de mangueras de incendios</li><li>• Posición de detectores de incendios</li></ul>	Dar a conocer la ubicación más cercana de los recursos para combatir un conato de incendio y, en caso de que conozca como emplearlos, sofocar el conato.
Evacuación	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vías de evacuación</li><li>• Salidas de emergencia</li></ul>	Mostar al visitante su ubicación para que puede salir o evacuar por la salida de emergencia más cercana.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para que el visitante a una instalación de gran área pueda saber con exactitud donde se encuentra ubicado dentro del edificio, es necesario que distinga claramente los elementos más importantes que se colocan en los mapas el riesgos, recursos y evacuación.

#### 4.3. Arquitectura de los mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligentes

Con la finalidad de que se pueda utilizar los mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligentes (MRREI), se plantea el utilizar la arquitectura IIRA. Se escoge este tipo de arquitectura debido a que permite trabajar con un nivel muy alto de abstracción al separar la arquitectura de los detalles y complejidades técnicas, y más bien se enfoca en identificar lagunas tecnológicas fundamentándose en el marco arquitectónico.

En la arquitectura IIRA se habla de cuatro puntos de vista: negocio, uso, funcionalidad e implementación.

##### 4.3.1. Punto de vista del negocio

En el punto de vista del negocio se exponen los problemas encontrados que se relacionan con el negocio y que son importantes para la alta dirección de la organización. A continuación se exponen los conceptos clave.

###### **Actores relevantes.**

- Responsable de Seguridad y Salud Ocupacional de la organización.
- Trabajadores, visitantes, proveedores.
- Integrador de sistemas.

###### **Visión.**

Conseguir un alto grado de independencia en la toma de decisiones de las personas que se encuentran en un edificio para actuar ante un incendio sin poner en riesgo su integridad física.

###### **Valores.**

- Contribuir a la disminución de pérdidas en el evento de un incendio.
- Aumentar la probabilidad de sobrevivir a un incendio en el lugar donde se encuentre la persona.
- Apoyar el cumplimiento de la normativa local en materia de prevención de incendios.

###### **Objetivos clave.**

- Reducir los tiempos de evacuación.
- Dar a conocer de manera clara la ubicación de la persona en la instalación.
- Generar estrategias de aplicación del plan de emergencia en caso de incendio.

### **Capacidades fundamentales.**

- Predecir el tiempo de decisión de la persona para evacuar del edificio.
- Analizar la actuación independiente, ordenada y segura de las personas en un incendio.
- Mejorar la protección contra incendios sobre pasando lo establecido en la normativa vigente en materia de prevención de incendios.

#### **4.3.2. Punto de vista del uso**

En este punto se explica cómo funciona el sistema, es decir, como la persona que se encuentra en la instalación emplea la implementación de la digitalización de los MRREI.

**Tabla 4. Tareas y roles desde el punto de vista de uso.**

<b>Mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligente</b>	
<b>ACTIVIDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Desencadenante</i>: Alarma de incendios.</li><li>- <i>Flujo de trabajo</i>: La persona recibe la notificación de evacuar en su dispositivo móvil, el administrador de redes procesa la alarma, el director de inteligencia recoge la alarma y el controlador valida el plan de operación.</li><li>- <i>Efecto</i>: remite información respecto a: localización, ubicación de extintores, vía de evacuación más cercana y segura.</li><li>- <i>Restricciones</i>: espacio de las vías de evacuación, capacidad de los medios de egreso.</li></ul>
<b>PARTES</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Responsable de Seguridad y Salud Ocupacional.</li></ul>
<b>ROLES</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Director de inteligencia, responsable de Seguridad y Salud Ocupacional.</li></ul>
<b>TAREAS</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Director de inteligencia</i>: recoge información del sistema de detectores de incendios, provee la información de los extintores y de las vías de evacuación y elabora el plan de contingencia.</li><li>- <i>Responsable de Seguridad y Salud Ocupacional</i>: ejecuta en campo el plan de contingencia verificando su cumplimiento.</li><li>- <i>Controlador</i>: Ejecuta el plan de operación.</li></ul>

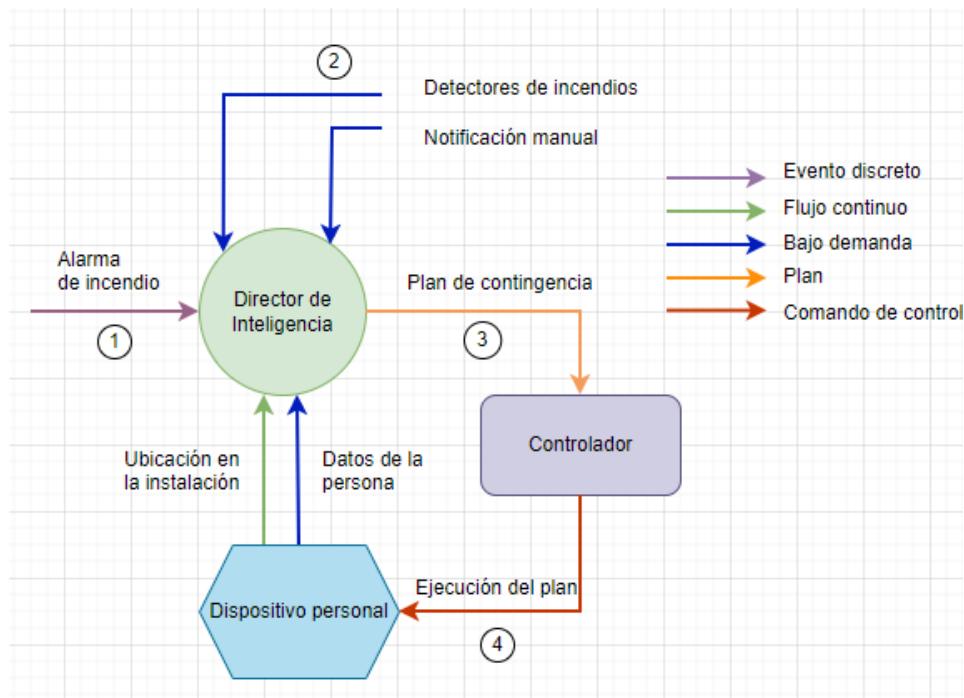
Fuente: Elaboración propia, 2022.

La capa de uso se representan las siguientes interacciones con los flujos de información:

- El sistema recibe una alarma de incendios.
- El director de inteligencia recibe otros insumos como son las señales de los detectores de incendios y notificaciones manuales de los pulsadores de emergencia.

- El director de inteligencia genera un plan de contingencia que incluye la evacuación del lugar ocupado por las personas.
- El controlador se encarga de validar el plan de contingencia y da la orden para que los sistemas correspondientes trabajen, por ejemplo, el sistema de ventilación se desconecta o los ascensores descienden a la planta baja y dejan de operar. En este caso, también se remite las instrucciones al dispositivo personal de la persona para que pueda evacuar con seguridad y en el menor tiempo posible.

**Figura 27. Capa de vista de uso**



Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 4.3.3. Punto de vista funcional

El punto de vista funcional se compone de cinco dominios: control, operaciones, información, aplicación y de negocio.

##### **Dominio de control.**

En esta capa se encuentran los sensores y controladores del sistema. En el caso de esta propuesta, se utilizan varios tipos de sensores: de ubicación de la persona, detectores de humo y de calor.

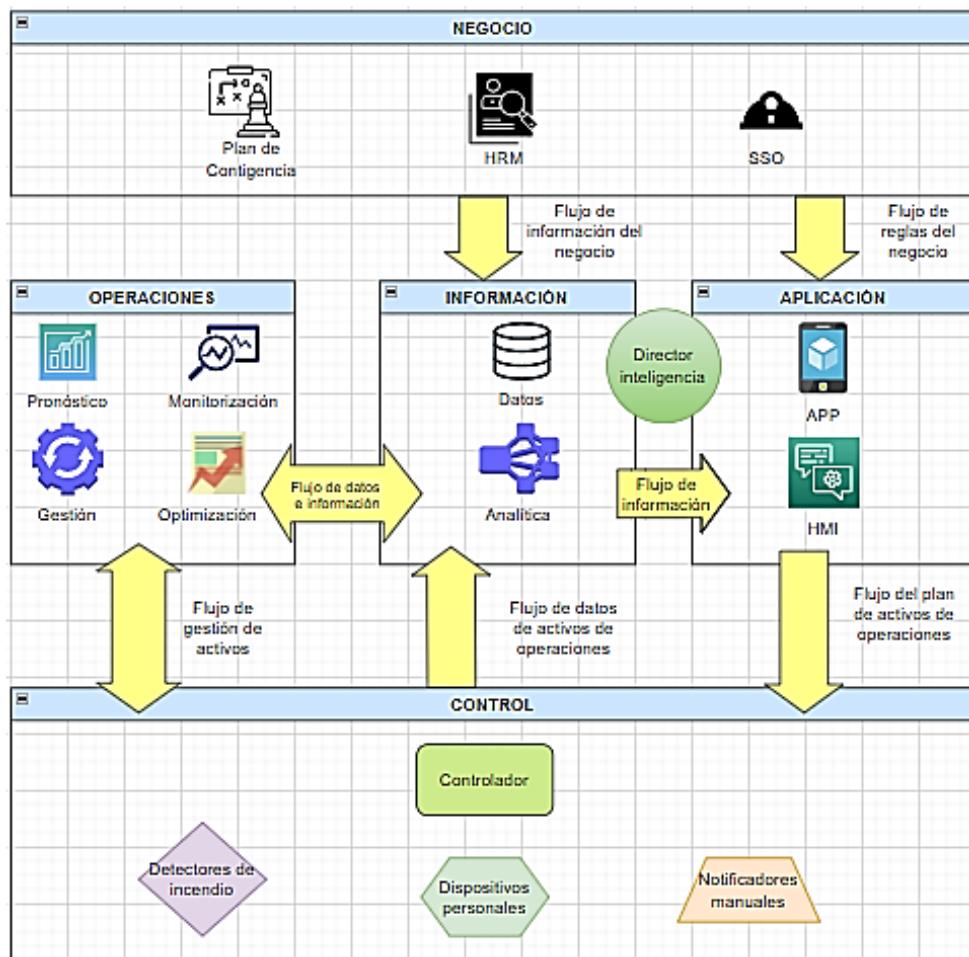
##### **Dominio de operaciones.**

El dominio de operaciones supervisa al dominio de control. En este dominio se realiza la monitorización, el pronóstico y el diagnóstico de dispositivos personales (nodos), para posteriormente realizar la gestión de la evacuación de las personas de la mejor manera.

### **Dominio de información.**

En el dominio de información se centraliza los datos de los otros dominios y se realiza el análisis de los datos con la finalidad de obtener modelos optimizados que se comunicarán luego en los dominios restantes.

**Figura 28. Dominios funcionales.**



Fuente: Elaboración propia, 2022.

### **Dominio de aplicación.**

En esta parte se incluyen las interfaces de usuario que ayudará a los administradores a tomar buenas decisiones y mejorar al sistema. Se pueden dividir en dos interfaces una de administrador y otra para el encargado de la programación del sistema.

### **Dominio de negocio.**

Este dominio se enfoca en la seguridad humana, que es el principal activo de cualquier organización. Adicionalmente, se enfoca en reducir las deficiencias al momento de evacuar las personas e interrelaciona con los sistemas de seguridad de la organización (SSO) y de gestión de recursos humanos (HMR).

#### **4.3.4. Punto de vista implementación**

##### **Nivel 1 Bus de datos de control.**

En este nivel se parte de la utilización del dispositivo personal de la persona (teléfono celular, Tablet, laptop o reloj inteligente) para conocer su ubicación dentro del edificio, fábrica u otro centro de concentración masiva. Estos datos son remitidos a un controlador que los procesará y los empleará para organizar la evacuación de las personas en caso de un incendio dentro de la ocupación.

El sistema cuenta con un módulo de autenticación de usuario que se basa en la radiofrecuencia (tarjetas RFID) para confirmar porque accesos a pasado una persona. Generalmente, en el caso de una evacuación las personas tienden a salir por donde ingresaron, de esta manera se puede establecer que salidas se encontrarán más congestionadas y demorarán el egreso de las personas, aumentando de esta manera la posibilidad de morir por la inhalación de gases, humos o productos de la combustión de un incendio.

##### **Nivel 2 Bus de análisis de datos.**

Los controladores que se encuentren distribuidos en las instalaciones de la ocupación, remitirán los datos al controlador principal y se almacenarán en una base de datos. De esta manera se puede tener un histórico de que personas acuden a un área de la instalación específica y con qué frecuencia. Esto es de vital importancia el momento de una evacuación debido a que un empleado que lleva tiempo en la empresa conoce cuales son las rutas de evacuación o las zonas de peligro dentro de la instalación. En cambio, un visitante o una persona recién contratada o proveedores eventuales no distinguen o se ubican bien en el lugar donde se encuentran.

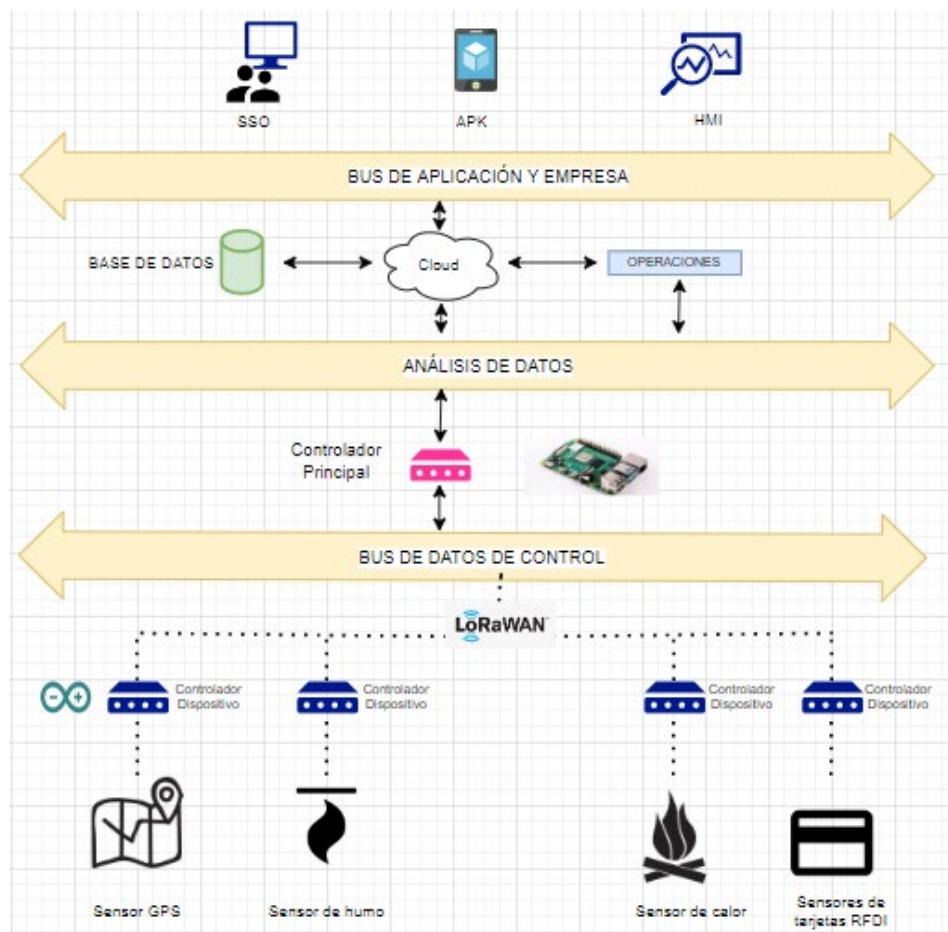
La base de datos permitirá actualizar la vía de evacuación que se puede emplear de acuerdo a su carga de ocupantes.

### Nivel 3 Bus de aplicación y empresa.

Las operaciones que se realicen van a estar visibles para el administrador. El sistema se actualizará de tal manera de tener los datos en tiempo real. Se utilizará el aplicativo del dispositivo personal para que el usuario pueda interactuar con el mapa de riesgos, recursos y evacuación inteligente y pueda evacuar de manera rápida, segura y confiable.

En esta propuesta se emplea el patrón de bus de datos en capas debido a que es la arquitectura más común en sistemas IIoT en varias industrias. Para el caso de prevención de incendios, se escoge esta arquitectura debido a que, de acuerdo al estado del arte, los más grandes incendios ocurrieron en ambientes con áreas grandes, con gran cantidad de ocupantes y limitadas condiciones de acceso a las vías de evacuación.

**Figura 29.** Arquitectura de bus de datos.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 4.4. Propuesta de implementación de MRREI

Según la normativa vigente en materia de prevención de incendios en el Distrito Metropolitano de Quito, Ordenanza 470, y en el Reglamento de Prevención, Mitigación y

Protección Contra Incendios aplicado a nivel nacional, existen ocupaciones que deben proveer de un plan de emergencias de conformidad al área de la edificación o deben tener un plan de autoprotección con mapas de riesgos, recursos y evacuación.

Los estudios realizados por la NFPA establecen que las personas tratan de evacuar por el sitio que ingresaron al establecimiento, no prestan atención si existen otras salidas de emergencia o si en los mapas de riesgos, recurso y evacuación indican las rutas de evacuación y los puntos de encuentro.

**Figura 30.** Mapa de riesgos, recursos y evacuación instalado en cartelera.



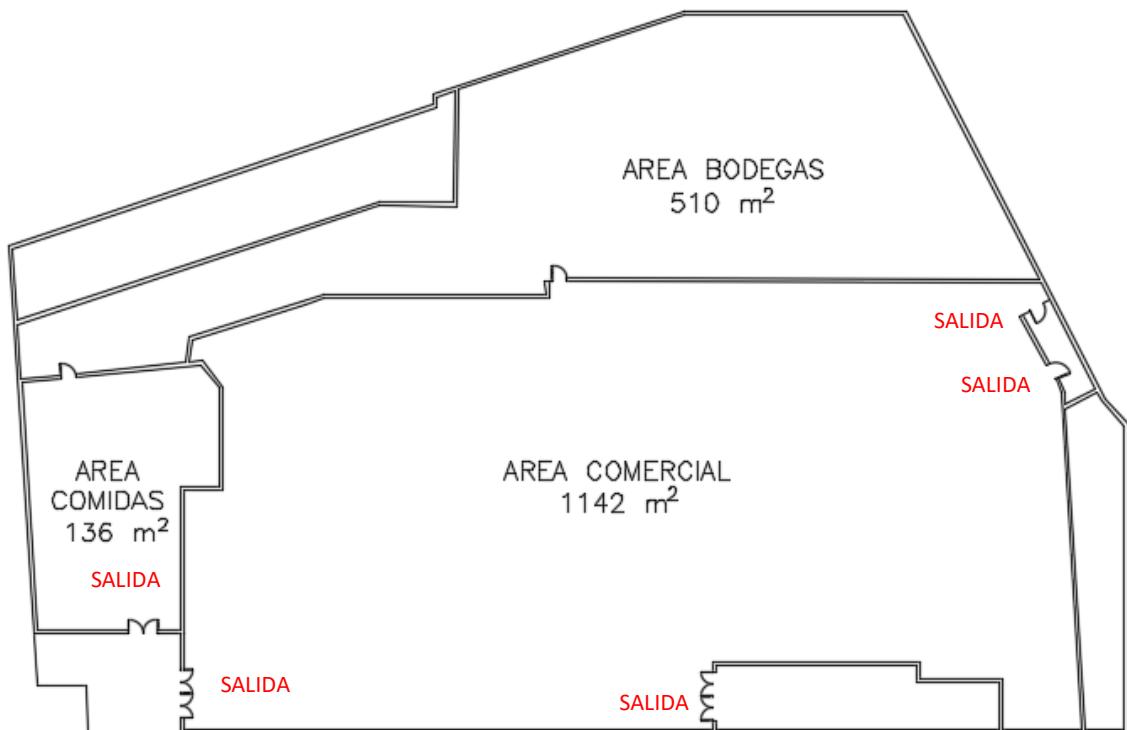
Fuente: Cartelerascorporativas.ec, 2022.

La desventaja de los mapas de riesgos, recursos y evacuación en formato impreso y físico es que se tiene que recurrir al sitio desde se encuentra instalado para poder acceder a la información. Esto se puede subsanar con una aplicación portátil en su dispositivo inteligente que indique al usuario la ruta más corta de evacuación en caso de emergencia.

Esta propuesta de implementación de los mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligentes, funcionará únicamente si es posible conocer la ubicación de la persona al interior del edificio de una ocupación mercantil, de rehabilitación, comercial, hospitalaria, etc.

Como propuesta de implementación se va a considerar una ocupación mercantil similar al supermercado que se incendió y cuyo caso se describió en el estado del arte. Se escoge esta ocupación debido a que, en los últimos años, han proliferado este tipo de negocios donde se venden múltiples productos y se tienen locales para la preparación de comidas o elaboración de productos de panadería y pastelería, lo que incrementa la posibilidad de un incendio como el que se describió en el capítulo 2.

**Figura 31.** Plano de implantación de propuesta.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Como primer paso se va a realizar el diseño para la distribución del sistema de balizas, posteriormente se explicará cómo se va a utilizar estas balizas con dispositivos inteligentes para generar la ruta y finalmente, se va a simular como sería la evacuación de las personas en esta edificación considerando que existen balizas que guían a las personas a las salidas de emergencia, aunque no hayan sido reconocidas por las personas al ingresar al local.

Se empieza describiendo lo que existe en el mercado actualmente respecto a los varios tipos de tecnologías que permiten realizar la transmisión de datos desde dispositivos instalados en un edificio hacia los dispositivos inteligentes utilizados por las personas.

**Tabla 5. Cuadro comparativo entre BLE beacons y otras tecnologías.**

	RFID	QR Code	Wi-Fi	NFC	BLE Beacons
<b>Consumo de energía</b>	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo
<b>Costo</b>	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo
<b>Información</b>	Constante y fija en la etiqueta	Constante y no puede ser personalizada	Dinámica, no constante y puede ser personalizada según la frecuencia, ubicación y tiempo.	Constante y fija en la etiqueta	Dinámica, no constante y puede ser personalizada según la frecuencia, ubicación y tiempo.
<b>Comunicación</b>	Uno a uno	Uno a uno	Uno a varios	Uno a uno	Uno a uno y uno a varios
<b>Uso</b>	Identifica elementos y rastrea el inventario	Escanear información	Múltiple	Para pagos	Proximidad, marketing cercano, notificación de pagos, seguimientos de activos, posicionamiento interior, etc.
<b>Cobertura en metros</b>	0.9 a 1.2	0.45 a 0.75	Sobre los 45	Menos que un metro (20 cm)	Sobre los 100 metros
<b>Acceso</b>	Requiere lectores especiales	Sólo algunos dispositivos móviles poseen la posibilidad de escanear códigos QR	En la mayoría de dispositivos móviles	Solamente en dispositivos Android No compatible con dispositivos iOS.	Cualquier dispositivo con Bluetooth Smart (4.0)

Fuente: Elaboración propia, 2022.

A continuación, se realiza la comparación entre la tecnología Bluetooth clásica y el Bluetooth Low Energy, para posteriormente escoger la que se utilizará en esta propuesta.

**Tabla 6. Cuadro comparativo entre BLE y Bluetooth clásico.**

	BLE	Bluetooth clásico
Consumo de energía	15mA o menos	30mA o más
Velocidad (tiempo dedicado a enviar datos / información)	3em	100em
Aplicaciones	Flujo no continuo de datos	Flujo continuo de datos
Tasa de transferencia de datos	200 kbps	2 a 3 Mbps
Conexión simultánea	Hasta 20 conexiones	Hasta 7 conexiones

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Finalmente, se señalan las ventajas y desventajas de emplear las balizas o beacons en la comunicación con los dispositivos que manejan las personas.

**Tabla 7. Ventajas y desventajas de las beacons.**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Facilidad de montaje e instalación.</li><li>• Precio bajo.</li><li>• Facilidad de mantenimiento.</li><li>• Facilidad en implementación y operación.</li><li>• Adaptable a múltiples aplicaciones.</li><li>• Puede recopilar datos.</li><li>• Puede sugerir productos o servicios.</li><li>• Es multisectorial: industria, hotel, museos, oficinas, etc.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se debe tener instalada una aplicación.</li><li>• Pueden ser inhibidos dependiendo de la calidad de la conexión.</li><li>• Las baterías pueden causar problemas de sulfatación en los terminales.</li><li>• Si remite exceso de información, los usuarios pueden desinstalar la aplicación.</li></ul>

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Luego de analizar las tecnologías que se pueden emplear para implementar la propuesta, se obtiene como resultado que el emplear la tecnología Bluetooth de bajo consumo de energía BLE beacons es la mejor opción debido a su bajo costo, bajo consumo de energía y cobertura.

#### 4.4.1. Tipo de comunicación

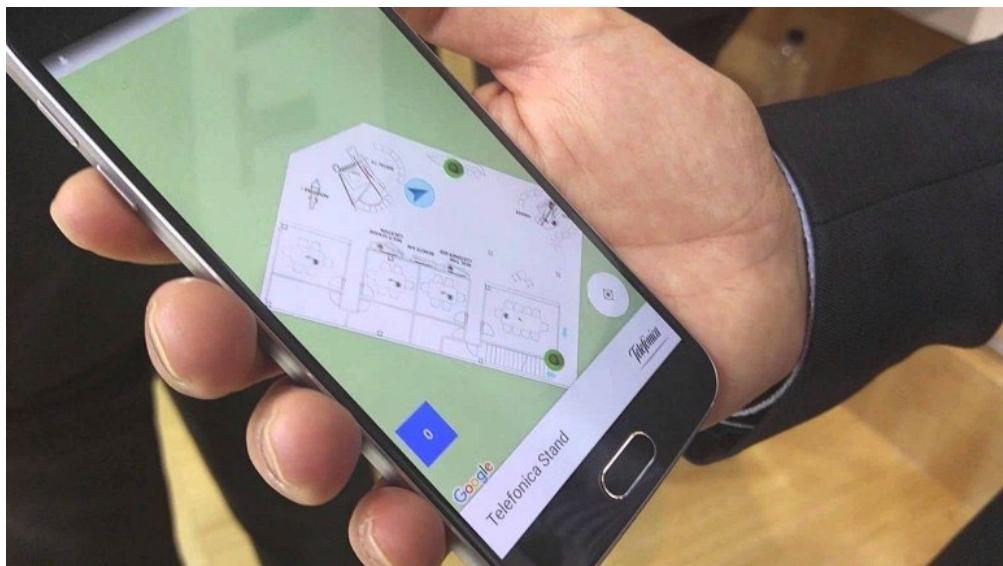
##### Localización Multisensorial

En el mercado se pueden encontrar algunas aplicaciones como la de la empresa Telefónica, que en año 2016 lanzó el servicio denominado "localización multisensorial" que permite localizar a una persona con un dispositivo inteligente en el interior de edificios aun cuando sea un espacio donde el GPS no funciona.

Actualmente, este tipo de servicios se emplea en el marketing inteligente, es decir, en centros comerciales en los cuales se ofrecen los productos a la persona que se encuentra cerca del local y se le remite la forma de llegar al mismo.

En este caso, no se va a utilizar la localización multisensorial para remitir información de servicios o productos, sino que se va a emplear para guiar a las personas de manera segura a la zona de seguridad ubicada en el exterior del edificio utilizando la ruta más corta y menos congestionada.

**Figura 32.** Localización multisensorial de la empresa Telefónica.



Fuente: tecnomagazine.net, 2022.

En este caso es la red de comunicación 4G o 5G la que se encarga de transmitir los datos provenientes de los sensores del smartphone a la nube de telefónica, donde la empresa Telefónica emplea varios algoritmos e Inteligencia Artificial para escoger los datos más relevantes para determinar la posición de la persona con un error de un metro.

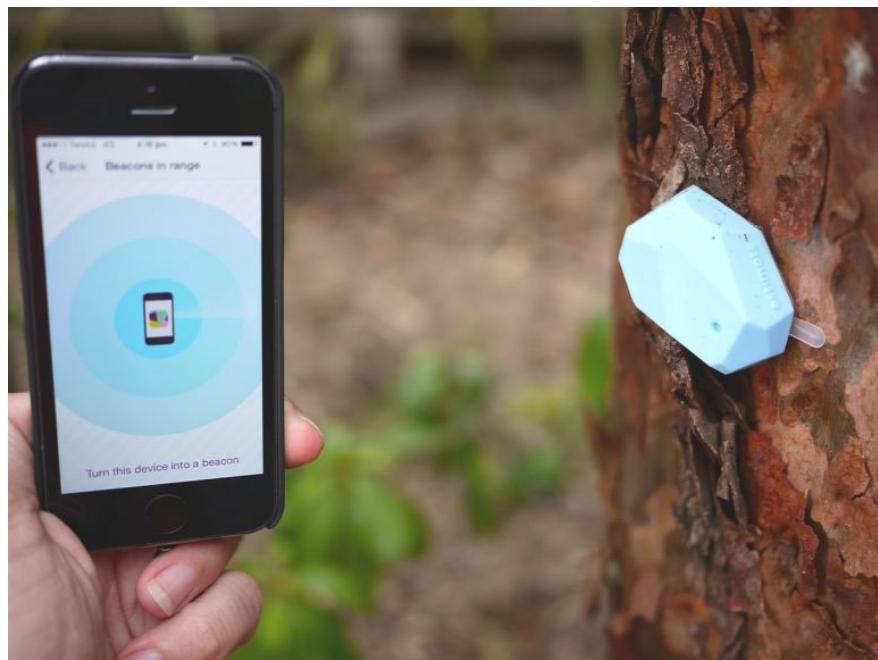
### **Bluetooth de baja Energía (BLE)**

En este caso se emplean varios dispositivos ubicados dentro de las instalaciones. Estos sensores se comunican con el dispositivo inteligente mediante la tecnología de Bluetooth de baja energía (BLE). Estos dispositivos emiten continuamente señales de onda corta y son la solución más conveniente en lugares de los edificios, como los subsuelos o sitios sin cobertura celular, para guiar a las personas.

La cobertura de este tipo de comunicación es de hasta 50 metros y actualmente se emplea en establecimientos comerciales para poder interactuar con las preferencias de compra de los clientes en tiempo real. Para establecer la comunicación se necesita de Bluetooth 4.0.

Para que exista interacción con el dispositivo BLE, se necesita una aplicación que debe ser descargada al dispositivo inteligente para leer el contenido emitido por las señales emitidas por los dispositivos.

**Figura 33.** Dispositivo con comunicación BLE.



Fuente: Bluumi.net, 2022.

Para el caso de la implementación propuesta se escoge la comunicación con Bluetooth de baja energía debido a que, en algunas ocupaciones, la señal de la red celular se pierde cuando, por ejemplo, se ingresa a los ascensores, se está en los subsuelos, parqueaderos cubiertos, zonas rurales, etc. Esto ocasionaría que los MRREI no puedan aparecer correctamente en los dispositivos inteligentes.

#### 4.4.2. Sensores

Para esta propuesta se emplean dos grupos de sensores: los del dispositivo inteligente y los instalados en el edificio de la ocupación.

Los sensores del dispositivo inteligente se emplean para generar la ubicación del mismo y, por consiguiente, la de una persona. Los tipos de sensores que se utilizan son: el giroscopio, acelerómetro, inclinómetro, sensor de luz, etc.

Para que los sensores de dispositivo inteligente funcionen, el dispositivo debe estar conectado al internet por medio de WiFi o datos móviles y debe estar activado el bluetooth.

En cambio, para poder transmitir información desde y hacia los dispositivos inteligentes dentro de los edificios o en espacios donde no hay cobertura celular, se ha extendido el empleo de sensores denominados balizas electrónicas o beacons.

**Figura 34.** Sensores de dispositivo inteligente.

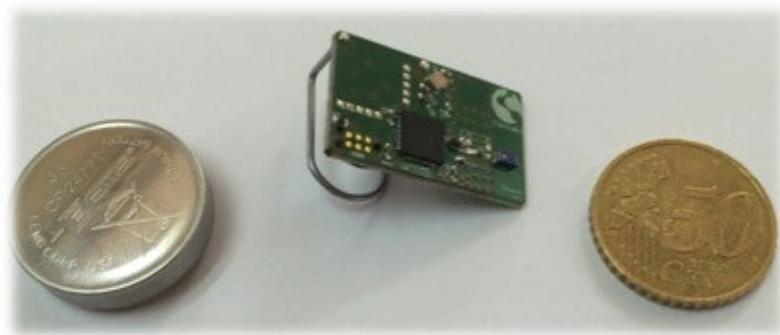


Fuente: Cuwhois.com, 2022.

Las balizas electrónicas es un dispositivo que transmite una señal de baja energía a dispositivos inteligentes que se encuentren a corta distancia sin sincronización previa. Esta distancia puede ser de hasta 50 metros.

Los beacons de Bluetooth son empleados ampliamente en el marketing de proximidad para asociar la mercadería de un lugar con el cliente que ingresa a recorrer el sitio. Y finalmente, se debe haber descargado la App que sea compatible con el sistema del dispositivo móvil.

**Figura 35.** Tamaño de beacon



Fuente: Thevalley.es, 2022.

Otra característica favorable para los MRREI es que los beacons son unidireccionales, es decir, no son capaces de recibir datos, lo que no permitiría ser manipulados o alterados por hackers que deseen cambiar el contenido de la información que transmiten.

El bajo consumo de la batería es otra característica muy favorable de estos dispositivos debido

a que pueden trabajar con baterías que duran hasta 2 años o conectarse a una fuente externa.

#### 4.4.3. Firmware de los beacons.

De acuerdo con el fabricante se tendrá un firmware específico para cada beacon. Con la configuración del firmware se puede controlar algunos aspectos que pueden afectar la duración de la batería.

##### 4.4.3.1. Advertising Interval.

Es el tiempo con el cual el beacon emite la señal. La relación entre la advertising Interval y la duración de la batería es directamente proporcional, es decir, a mayor tiempo del advertising Interval, mayor será la duración de la batería, pero el dispositivo receptor disminuye su respuesta.

##### 4.4.3.2. Potencia de transmisión.

La potencia de transmisión de los beacons es fija y se denomina comúnmente Tx Power. Si el Tx Power disminuye, la intensidad de la señal disminuye y el consumo de batería se aumenta.

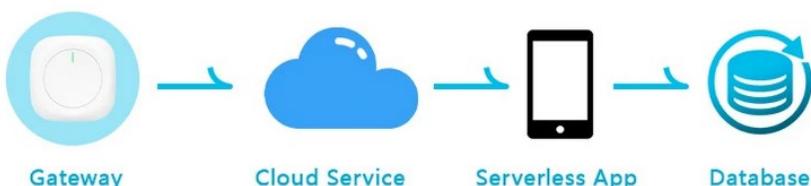
#### 4.4.4. Infraestructura en la nube.

La aplicación que se basa en la nube, analiza todas las señales que emiten los beacons y toma acciones de acuerdo con la señal recibida. Es el celebro que permite que las operaciones se ejecuten. Los datos de los BLE beacons pueden ser consumidos de dos maneras: mediante una puerta de enlace o una aplicación en el teléfono u otro dispositivo inteligente.

##### 4.4.4.1. Mediante puerta de enlace.

La puerta de enlace recopilará todos los datos antes de remitirlos a la nube. Esto puede ser realizado por Wi-Fi, protocolos LTM-M, NB-IoT o inclusive Ethernet. Posteriormente, un servidor activará las señales de la baliza en los campos que se encuentren en la base de datos.

**Figura 36.** Puerta de enlace para beacons.

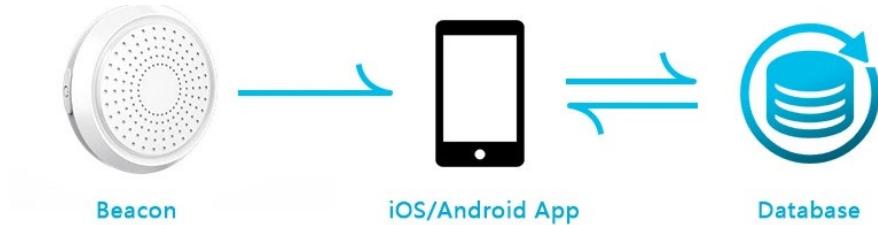


Fuente: mokosmart.com, 2022.

#### 4.4.4.2. Mediante aplicación celular.

Los dispositivos inteligentes con sistema iOS y Android pueden consumir datos de las balizas siempre y cuando posean instalada la aplicación específica. Generalmente, las aplicaciones pueden trabajar cuando el dispositivo inteligente está desconectado. Al final, es el usuario del dispositivo el que decide que mensajes abre o elimina.

**Figura 37.** Aplicación celular para beacons.



Fuente: mokosmart.com, 2022.

#### 4.4.5. Beacon mobile SDK.

Los beacons se integran con las aplicaciones móviles que facilitan la localización del dispositivo. Generalmente, el proveedor de beacons adjunta un kit de desarrollo para alcanzar el máximo provecho al uso de estos dispositivos.

#### 4.4.6. Protocolos de los beacons.

Los dispositivos Bluetooth de baja energía están en la capacidad de intercambiar datos en uno de los siguientes estados: modo conectado y modo advertising.

En el modo conectado transfiere datos en una transmisión y se emplea un atributo genérico denominado GATT. En cambio, el modo advertising utiliza un perfil de acceso genérico denominado GAP que se utiliza para enviar datos a cualquier dispositivo que se encuentre cerca. Al emplear este modo, existe transferencia de un beacons a varios dispositivos con lo que no se garantiza que los datos transmitidos tengan coherencia.

Los tres estándares que se van a describir utilizan el BLE y utilizan los canales 37, 38 y 39 para evitar entrar en conflicto con el Wi-Fi.

##### 4.4.6.1. iBeacon

Es un protocolo desarrollado por Apple introducido por primera ocasión en el 2013. Aunque Apple hizo conocer a nivel mundial esta tecnología, fue Nokia quien la creó.

En iBeacon transmite un identificador universal único que es tomado por la aplicación o por algún sistema operativo compatible. El identificador, en conjunto con otros datos enviados, puede ser utilizado para identificar la posición física del aparato inteligente, o ejecutar acciones según sea la localización como notificaciones de interés.

El iBeacon es un protocolo que introduce la tecnología BLE donde se definen tres parámetros:

- UUID: identifica un grupo.
- Major: Identifica un subgrupo de beacons dentro de un grupo más grande.
- Minor: Identifica un beacon específico.

**Figura 38.** Ejemplo de iBeacons.



Fuente: [ahorasomos.izertis.com](http://ahorasomos.izertis.com), 2022.

#### 4.4.6.2. Eddystone

Es un proyecto que emplea código abierto. Fue presentado por Google con el objetivo de incentivar la utilización del IoT. Este protocolo es soportado por sistemas Android y iOS. Fue lanzada en el año 2015.

Juntamente con los paquetes de envío de datos como Eddystone -UID y Eddystone -URL, se emplea el paquete Eddystone-TLM para sensar el estado de la batería de la baliza.

Para colaborar con los desarrolladores, Google suministra las API de Nearby y Proximity para transmitir datos a los dispositivos que se encuentren dentro de un rango de distancia seleccionado, a la vez que monitorea los beacons.

En resumen, Eddystone puede emitir los siguientes paquetes:

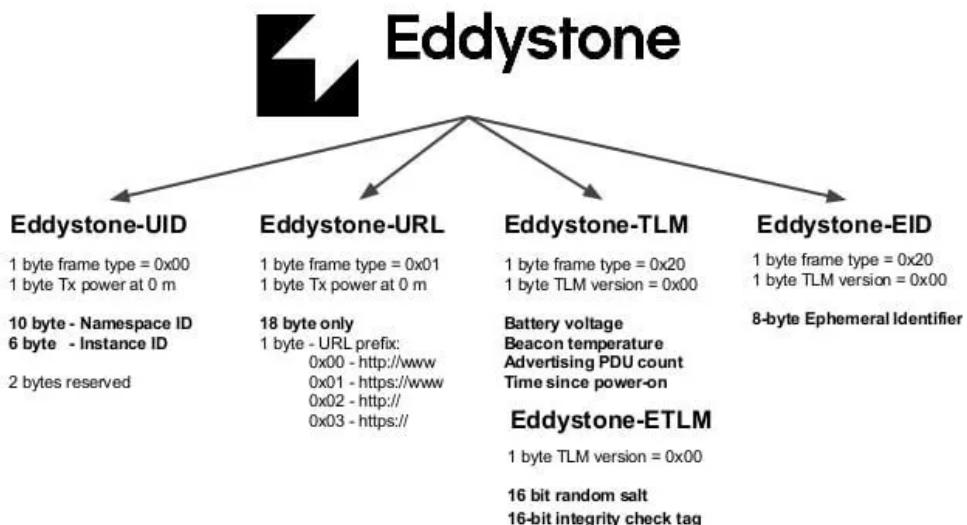
- Eddystone – UID: abarca un identificador de beacon. Transmite una ID de baliza única.
- Eddystone – URL: contiene una URL. Permite al usuario ir a la página web tocando el URL transmitido por el beacon.

- Eddystone – TML: Permite conocer el estado de salud del beacon y es emitido con los otros dos paquetes.
- Eddystone – EID: ocupa un identificador encriptado que cambia periódicamente.

Las especificaciones de este protocolo se pueden encontrar en el siguiente link:

<https://github.com/google/eddyStone>

**Figura 39.** Formato de protocolo de baliza Eddystone de Google.



Fuente: mokosmart.com, 2022.

#### 4.4.6.3. AltBeacon

Es un protocolo desarrollado por Radius Networks que fue lanzado en 2014. Tiene la finalidad de ofrecer las mismas funcionalidades que iBeacon pero con gratuidad y open source. Tiene la ventaja de entregar más información en cada mensaje que emite. AltBeacon que puede ser utilizado en plataformas Android, Windows y Linux.

AltBeacon define un paquete de transmisión Bluetooth que es diferente de iBeacon pero funciona de la misma manera, creando interoperabilidad, de manera que se usa generalmente con un identificador de tres partes con las mismas longitudes de bytes que las utilizadas en iBeacon.

Mientras que iBeacon define un UUID de proximidad, major y minor; con AltBeacon utiliza Id1, Id2 e Id3, que funcionan exactamente de la misma manera.

Debido a que AltBeacon es un formato de transmisión diferente de iBeacon, los sistemas que

usan iBeacon en iOS y AltBeacon en Android generalmente usan lo que se llama un beacon de intercalación; la cual envía dos formatos diferentes en un solo paquete.

Las librerías de AltBeacon se pueden encontrar en el link: <https://github.com/AltBeacon/android-beacon-library4.4.6.4>.

#### 4.4.6.4. GeoBeacon

Desarrollado por empresa Tecno Word es utilizada para posicionar al dispositivo tanto dentro como fuera de las edificaciones. Geobeacon es un protocolo que emplea un formato de mensaje para anuncios de balizas de proximidad. Estos anuncios son transmitidos por dispositivos que desean dar a conocer su posición. Los mensajes contienen información que se emplea para calcular la distancia que existe hacia la baliza, el estado de la batería, coordenadas geográficas y otros datos establecidos por el usuario.

Algunas soluciones que ofrece Geobeacon son: notificar al usuario que ha llegado al lugar deseado, enviar nuevas coordenadas al usuario del próximo punto de llegada.

Las librerías de Geobeacon se pueden encontrar en el link: <https://github.com/Tecno-World/GeoBeacon>

Realizada una breve descripción de los protocolos de beacons que se pueden utilizar, se hace un cuadro comparativo para poder seleccionar el que se utilizará en la implementación.

**Tabla 8. Cuadro comparativo entre tecnologías beacons.**

	iBEACON	Eddystone	AltBeacon	Geobeacon
Desarrollado por	Apple	Google	Radius Network	Tecno world
Características	Respaldado por Apple y con fuente restringida.	Es open source y puede ser desarrollado para la mayoría de negocios a un costo razonable.	Es open source. Es compatible con otras plataformas. Es ideal para crear soluciones flexibles.	Es open source. Es flexible para múltiples plataformas. Trabaja con ocho tipos de datos de los usuarios.
Compatibilidad	Es compatible con iOS y Android.	No es compatible con iOS y Android. Soporta plataformas que trabajan con BLE.	Compatible con múltiples plataformas móviles.	Compatible con múltiples plataformas móviles.
Perfil	Como propietaria del software, Apple controla las especificaciones.	Al ser open source, permite a los desarrolladores y negocios el acceso y contribuir.	Al ser open source, permite a los desarrolladores y negocios el acceso y contribuir.	Al ser open source, permite a los desarrolladores y negocios el acceso y contribuir.

Facilidad de utilización	Es altamente compatible con otros dispositivos iOS. No es simple de implementar.	Medianamente flexible. Es complicado durante la codificación e integración.	Relativamente fácil de desarrollar y utilizar.	Relativamente fácil de desarrollar y utilizar.
--------------------------	--	---	--	--

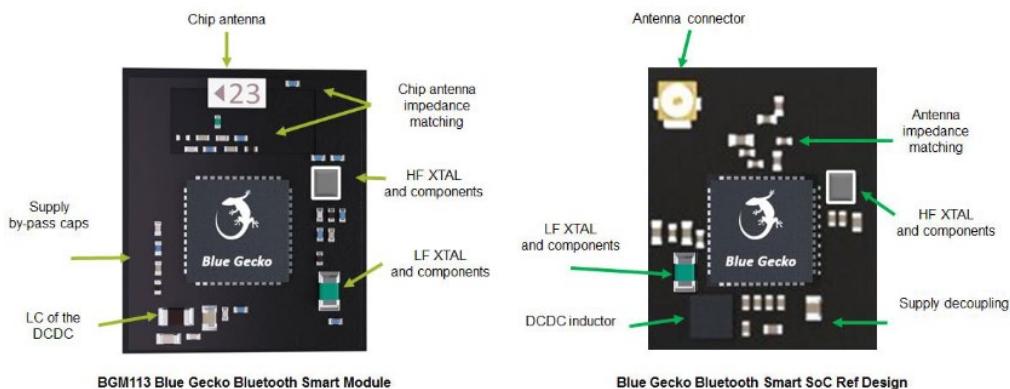
Fuente: Elaboración propia, 2022

Según el cuadro comparativo anterior, se concluye que para implementación de la solución se escoge a Eddystone debido a que es una tecnología open source, es relativamente accesible para desarrollar y utilizar, y finalmente, es compatible con múltiples plataformas múltiples de beacons.

#### 4.4.7. Hardware.

La baliza o beacon se compone de: SoC sistema de chip inalámbrico, batería o fuente de energía, y una carcasa de protección. También incluye en algunos casos, pulsadores, luces leds, zumbadores, etc. e inclusive puede tener sensores de luz, de temperatura o movimiento los cuales interactúan directamente con el SoC.

**Figura 40.** Módulos de baliza BLE.



Fuente: Silicon Labs, 2022.

De los dispositivos que se pueden encontrar comúnmente tienen un tamaño de 30 x 10 mm y pesa 7 gramos. Utilizados para transmitir en intervalos de 0.1 a 2 segundos y con diferentes niveles de transmisión desde -30 dBm a +4 dBm. Los chips que emplean son por ejemplo el TI CC254x de Texas Instruments y nRF51822 de Nordic Semiconductor.

Las balizas poseen principalmente la batería, el módulo inteligente Bluetooth y la placa de circuitos que lleva el firmware. Este software de bajo nivel tiene las instrucciones para hacer

que la baliza se comporte como se deseé.

**Figura 41.** BLE beacon



Fuente: Developex.com, 2022

Poseen un CPU pequeño y memoria reducida que es suficiente para hacer las cosas. Finalmente posee una antena para transmitir las ondas electromagnéticas a los dispositivos u otras balizas que se encuentren cerca.

**Figura 42.** Partes de un BLE beacon



Fuente: mokosmart.com, 2022

#### 4.4.8. Seguridad de los beacons.

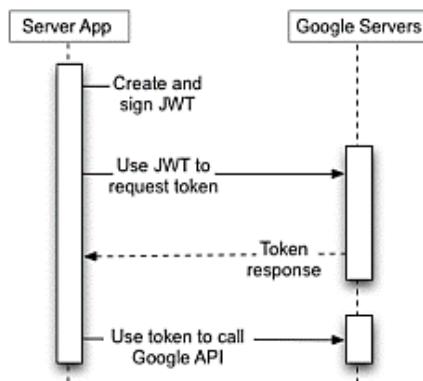
La fortaleza de un negocio radica en su punto más débil, es decir, en el empleo de los beacons, los hackers pueden utilizar estos dispositivos sin seguridad para hacer actos maliciosos. Las empresas que proporcionan los beacons deben brindar opciones de seguridad contra suplantación de identidad, utilización de contraseñas o cifrado de información.

Otra manera de evitar las intrusiones no deseadas es configurar las balizas para que emitan un identificador dinámico que no permite conocer ninguna información del beacon que la ha

emitido. Es decir, para poder conocer la verdadera identidad del beacon, se debe traducir el identificador dinámico. La API de Google en la que se han registrado los beacons tiene la posibilidad de ofrecer el servicio de traducir la identificación dinámica y remitir la identificación estática del beacon.

Las APIs de Google utilizan el protocolo OAuth 2.0 para gestionar las autorizaciones o autentificaciones.

**Figura 43.** Modelo de autentificación OAuth 2.0



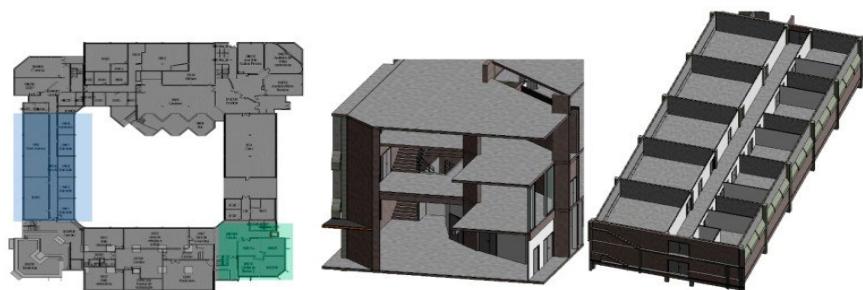
Fuente: 1library.co, 2022.

#### 4.4.9. Cantidad de Beacons.

Mientras más precisa se desee sea la localización y ubicación del dispositivo inteligente, mayor deberá ser la cantidad de beacons instalados. El valor preciso para una aplicación dependerá del área que se desea cubrir considerando la arquitectura interna o distribución del ambiente.

Se emplea una relación de un alcance de 5 m<sup>2</sup> por cada beacon. Es decir, si se desea instalar los dispositivos en un área de 1000 m<sup>2</sup>, se requerirá entre 15 a 20 beacons para cubrir el área si la ocupación es de una oficina.

**Figura 44.** Planos de una edificación típica con varios niveles y ambientes.



Fuente: Ferreira, J.C., 2018.

En general, dependerá mucho de la arquitectura del lugar, los elementos que se encuentran en su interior para poder determinar exactamente la cantidad de balizas que se requerirán.

**Tabla 9. Cantidad de beacons aproximada por tipo de ocupación.**

Ocupación	Área	Cantidad de beacons					
		Número de pisos					
		1	2	3	4	5	6
Oficina	100	1-5	2-10	3-15	4-20	5-25	6-30
	500	5-10	10-20	15-30	20-40	25-50	30-60
	750	10-15	20-30	30-45	40-60	50-75	60-90
	1000	15-20	30-40	45-60	60-80	75-100	90-120
Industria	500	5-10					
	1000	5-10					
Aeropuerto	5000	15-20					
Estación de tren	500	1-5					
	1000	5-10					
Hospital	500	5-10	10-20	15-30	20-40	25-50	30-60
	1000	15-20	30-40	45-60	60-80	75-100	90-120
	2000	30-35	60-70	90-105	120-140	150-175	180-210
Venta minorista	200	1-5	2-10	3-15	4-20	5-25	6-30
	500	1-5	2-10	3-15	4-20	5-25	6-30
	750	5-10	10-20	15-30	20-40	25-50	30-60
	1000	5-10	10-20	15-30	20-40	25-50	30-60
	1500	10-15	20-30	30-45	40-60	50-75	60-90
	2000	15-20	30-40	45-60	60-80	75-100	90-120

Fuente: <https://www.infsoft.com/basics/positioning-technologies/bluetooth-low-energy-beacons/>, 2022

Para la instalación de los beacons no sólo se debe tener en cuenta el área sino la distribución interna como mobiliario, divisiones, materiales, etc. En la siguiente tabla se resume el efecto de cada uno de ellos en la señal del beacon.

**Tabla 10. Atenuación de la señal del Bluetooth.**

Tipo de material	Tipo de atenuación			
	Baja	Media	Alta	Extremadamente alta
Madera	X			
Alta	X			
Materiales sintéticos	X			
Vidrio	X			
Ladrillo		X		
Mármol		X		
Yeso			X	
Hormigón			X	
Superficies revestidas de vidrio			X	
Metal				X

Agua				X
Personas				X

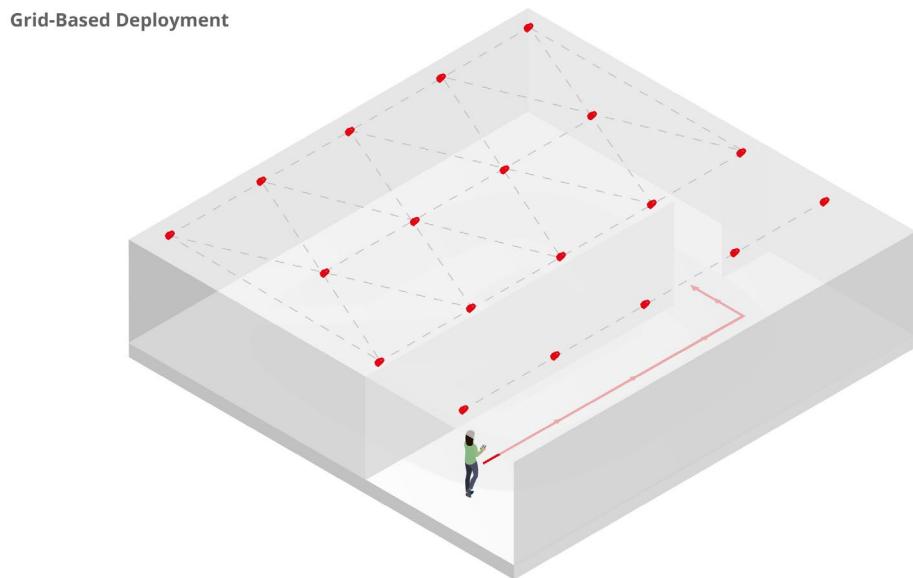
Fuente: Elaboración propia, 2022

#### 4.4.10. Criterios para instalar Beacons.

Para la distribución de los beacons es necesario conocer la distribución de la mampostería al interior del área, así como los posibles obstáculos que se pueden encontrar y disminuyan la propagación de la señal al interior. Se recomienda idealmente que cada punto que se va a monitorear dentro del área, esté cubierto por tres balizas, caso contrario, la localización exacta no será posible determinarla.

Otra recomendación para distribuir las balizas es aumentar la densidad de instalación a costa de reducir la intensidad de la potencia de la transmisión. Esto permite tener una red más estrecha, pero con mejor precisión para ubicar la posición del dispositivo móvil.

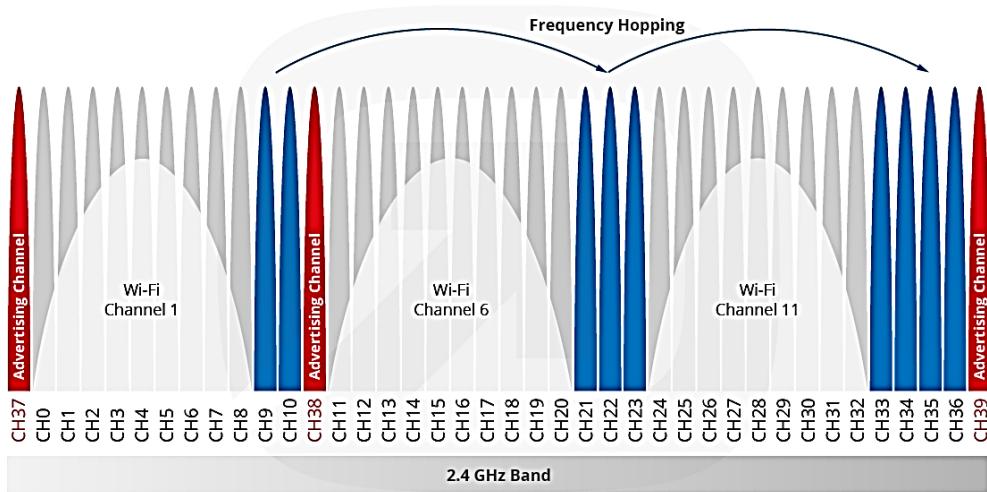
**Figura 45. Distribución en forma de malla de BLE beacon**



Fuente: infsoft.com, 2022

Con respecto a otras redes como el Wi-Fi que pueden estar presentes en el lugar donde se van a instalar, los beacons no afectan a otras redes, sin embargo, si el sitio donde se van a utilizar se encuentra con muchas señales de Wi-Fi es posible que ocurra una interferencia debido a que el BLE y Wi-Fi comparten el mismo rango de frecuencia. Como sugerencia en este caso, se puede configurar el Wi-Fi a utilizar los canales 1, 6, 7, 8, 9, 11 y 12 para que Bluetooth utilice los otros canales.

**Figura 46.** Utilización óptima de los canales para el uso simultáneo de BLE y Wi-Fi.



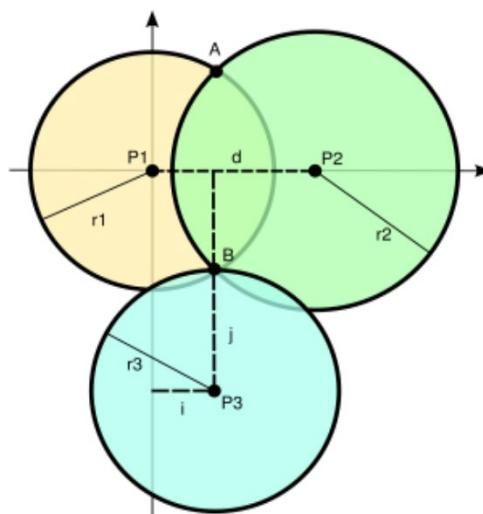
Fuente: infsoft.com, 2022.

#### 4.4.10.1. Trilateración.

Para esta propuesta de implementación de beacons, se va a emplear el método de Trilateración que es el mismo que se emplea en los sistemas GPS. Este método consiste en establecer las ubicaciones estimadas utilizando la geometría de los triángulos con sus distancias. A veces, se confunde este método con la triangulación que persigue el mismo objetivo, pero localiza el objeto midiendo los ángulos entre los puntos.

Para la Trilateración se requiere de por lo menos 3 balizas y sus mediciones.

**Figura 47.** Esquema de tres balizas para la trilateración.



Fuente: medium.com, 2022.

A continuación, se explica el algoritmo de Trilateración en los siguientes pasos. Se emplea el gráfico anterior para la explicación.

- Escoger los dos beacons más cercanos en distancia al dispositivo. En este caso el dispositivo se encuentra ubicado en el punto B y está más cercano a las balizas P1 y P2.
- Dibujar las circunferencias tomando como centro la ubicación de los beacons más cercanos (P1 y P2) y tomando como radio la distancia calculada ( $r_1$  y  $r_2$ ).
- Calcular la distancia  $d$  más cercana entre los centros de las dos circunferencias P1 y P2.
- Seleccionar los dos puntos más cercanos entre la intersección de las dos circunferencias, son los puntos A y B. La posición que se busca puede estar ubicada en cualquiera de estos dos puntos.
- Escoger el tercer beacon más cercano. Para este caso P3.
- Dibujar la circunferencia de P3 con el radio  $r_3$  que es igual a la distancia al dispositivo receptor.
- El punto más cercano de la circunferencia de centro P3 respecto a la recta que une A y B, indica la posición inequívoca del dispositivo, es decir, el punto B.

#### 4.4.11. Recomendaciones para adquirir Beacons.

Aunque cada baliza será adquirida de acuerdo al tipo de ocupación en el que se prevé emplearla, se tienen algunas recomendaciones generales que ayudarán a mejorar su selección.

##### 4.4.11.1. Rango de transmisión.

Se debe conocer a qué distancia se va a enviar los datos. Por ejemplo, en una ocupación comercial se necesitarán balizas con un alcance de 20 metros, sin embargo, en el caso de los MRREI se deben transmitir datos a largas distancias como 100 metros o más.

##### 4.4.11.2. Duración de la batería.

Se debe acudir a las especificaciones de las balizas para conocer qué tiempo aproximado se espera que duren las baterías y generar un plan de mantenimiento para sustituirlas para evitar que la baliza quede inutilizada por falta de energía. Como alternativa se puede emplear balizas con USB si no se puede dejar de abastecer con energía eléctrica. Esto es mandatorio en los MRREI debido a que, como protocolo de actuación en un incendio, los bomberos locales

acuden a cortar el suministro de energía eléctrica para evitar la reacción de aparatos energizados en el agua, por esto es mejor emplear balizas con alimentación independiente de baterías.

#### 4.4.11.3. Interior o exterior.

Una variable obvia al escoger el tipo de beacon es si se va a utilizar al exterior o interior. La diferencia radica en el nivel de protección al polvo y agua que deberá tener para que sus componentes electrónicos no se vean afectados si se instalan en el exterior.

#### 4.4.11.4. Tipo de plataforma.

La selección de la plataforma correcta permitirá el configurar y ejecutar correctamente la baliza. Si el objetivo es suministrar datos de ubicación se puede utilizar plataformas estándar o comunes, pero si se desea emplear para transmitir datos, sugerencias o instrucciones se requerirá una plataforma más completa.

Lo importante en el tipo de plataforma es que los datos generados, su analítica y organización de las balizas sea el que se espera y se necesitan.

#### 4.4.11.5. Presupuesto.

En general, el presupuesto se centra en el costo de la baliza, pero debe abarcar otros aspectos como son licencias, hardware, servidores, servicios en la nube. Finalmente, se debe ver la relación costo/beneficio. Para la propuesta el poder poner a salvo a las personas y evitar su muerte no tiene precio comparable.

#### 4.4.11.6. Protocolo admitido.

De preferencia se debe escoger balizas que puedan ser utilizadas con Eddystone o iBeacon con la finalidad de tener mayor flexibilidad en caso de que la implementación cambie.

#### 4.4.11.7. Power Tx.

Representa la cantidad de energía que emplea el beacon para transmitir los datos. A mayor poder Tx mayor consumo de batería requerirá y la vida útil de la batería disminuye. Generalmente se tiene un rango entre -30 dBm y +4 dBm.

#### 4.4.11.8. Portabilidad.

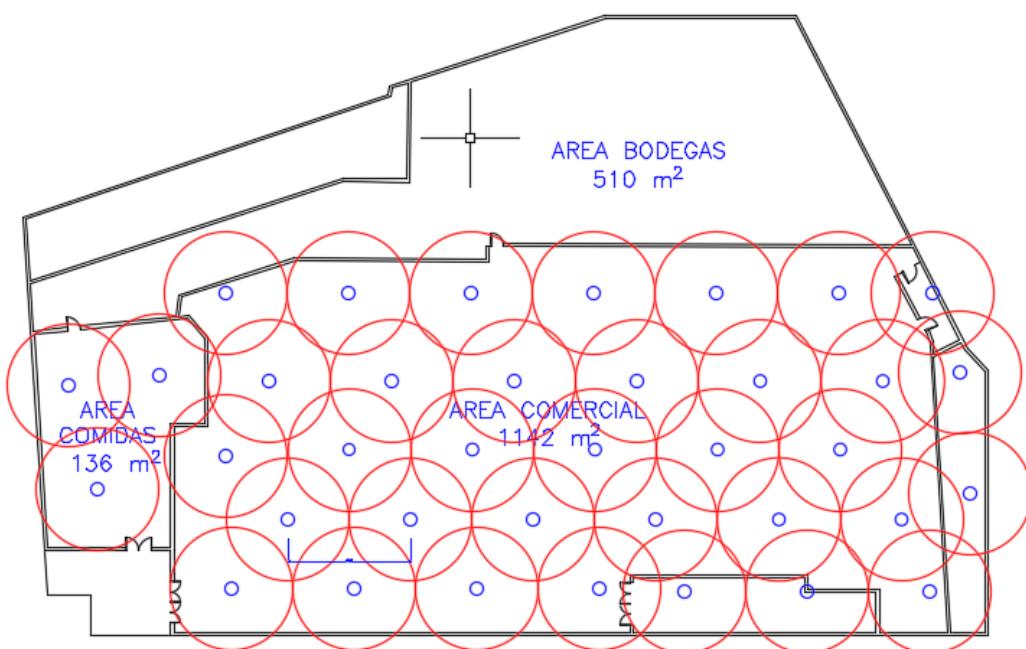
Si se requieren mover o cambiar de ubicación es necesario que la baliza sea portable y no permanezca fija en un lugar.

#### 4.4.12. Distribución de beacons en el techo del edificio.

Para la distribución de las balizas en el techo de la edificación, se considera que cada beacon cubre  $5 \text{ m}^2$ . Adicionalmente, no se considera que las áreas de cobertura son tangentes, sino que se intersecan, esto con la finalidad de asegurar que existe cobertura de área por cada beacon.

Luego de la distribución en el plano de la implementación en el Área Comercial y Área de Comidas, se tiene un total de 37 beacons.

**Figura 48.** Plano de cobertura de beacons en el techo del área comercial.

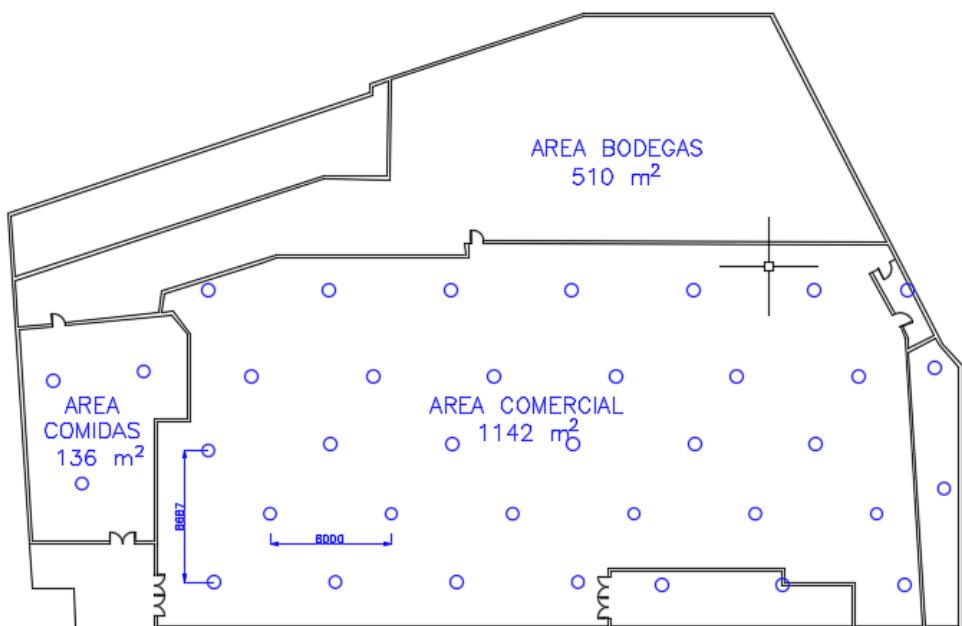


Fuente: Elaboración propia, 2022.

No se considera distribuir beacons en el Área de bodegas, debido a que es un área restringida para los clientes, sólo acceden los trabajadores del supermercado y se cree que los trabajadores del supermercado realizan simulacros de evacuación.

La separación de los beacons en el eje horizontal es aproximadamente 8 metros, mientras que la distancia entre las balizas en el eje y es de 8,6 metros.

**Figura 49.** Plano de distribución de beacons.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El área comercial y de comidas son los espacios en los que los clientes pueden moverse con libertad y son las áreas a evacuar en caso de un incendio. Se consideran que existen 3 salidas de emergencias: una es la entrada principal, otra es la que va a los parqueaderos y la última es por donde acceden los trabajadores al establecimiento.

Si existiera un incendio en el área de bodegas, los trabajadores pueden evacuar a la plataforma de entrada de los camiones que es un sitio abierto o pueden utilizar las salidas de emergencia de los clientes.

#### 4.4.13. Enfoque de la propuesta.

Si bien existen varias propuestas comerciales que relacionan a los beacons con la ubicación de sitios de interés como museos o sitios comerciales como tiendas o centros comerciales, en esta propuesta se va a utilizar a los beacons para guiar de manera segura a las personas hacia las salidas de emergencia. En este caso, los detectores de humo y rociadores activados indican la zona de la edificación que se encuentra en llamas y no puede ser utilizada como parte de del recorrido para la salida.

Existen algunas propuestas para utilizar a los beacons en hospitales y permitir que el doctor pueda encontrar a su paciente y utiliza una ruta para llegar a él. Otra propuesta es emplear los teléfonos para, mediante una aplicación, trazar la ruta más corta para llegar a una

habitación o ambiente que se desee. La diferencia con esta propuesta de TFM es que es un algoritmo el que remite el mapa del sitio donde se encuentra la persona, en este mapa se le indica donde se encuentra y se le guía hasta que pueda llegar a la salida de emergencia y evacúe el lugar.

En ese sentido se va a realizar la descripción de la implementación de una aplicación para ayudar con la orientación de las personas en el interior de las edificaciones utilizando balizas BLE para la ubicación y se empleará la información de los planos con desarrollados en CAD para incluir la información física del edificio. Oro objetivo que se puede esperar conseguir y que no es objeto de este TFM, es validar el comportamiento de las personas en simulacros empleando una herramienta de las balizas BLE.

Se debe desarrollar una aplicación que permita en primer lugar obtener y señalar la ubicación actual de la persona mediante el empleo de las zonas de las balizas, mientras que, en segundo lugar, la aplicación debe establecer con su algoritmo, la salida de emergencia más cercana y la distancia de recorrido hasta encontrarla. Este recorrido se superpone al plano en CAD para que la persona pueda entender claramente que ruta debe seguir.

A continuación, se describe el rol que cada componente va a tener:

- Usuario final: es cualquier cliente del supermercado que tiene instalada la aplicación en su dispositivo inteligente.
- Administrador de Sistemas y Base de Datos: es quien se encarga de obtener los planos en CAD del edificio, elabora los mapas de evacuación, establece la geometría del edificio, determina la ubicación de las beacons, configura e instala las balizas en el edificio.
- Desarrollador: se encarga de desarrollar y mantener el código de la aplicación móvil.

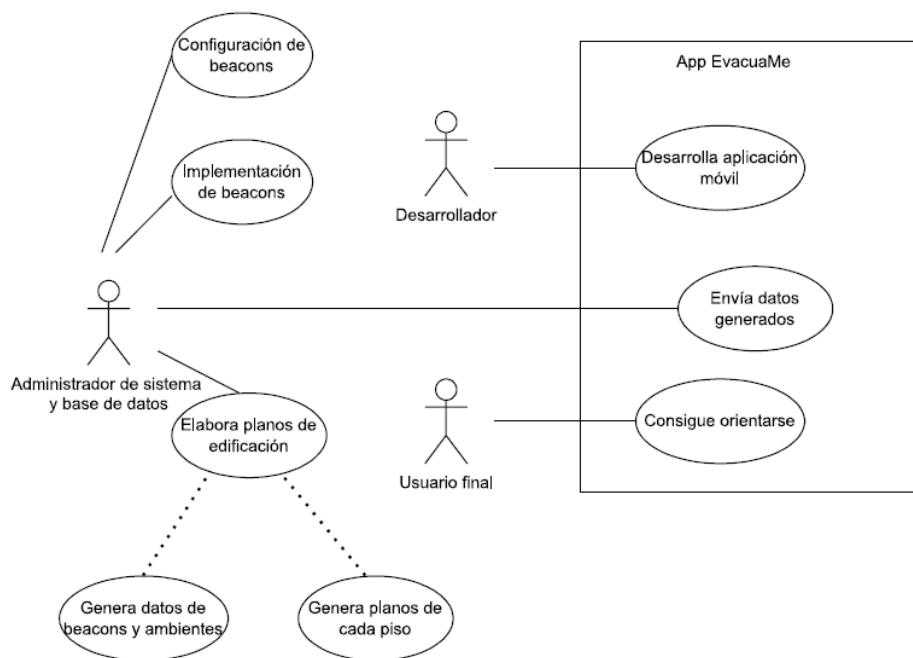
La aplicación móvil posee tres módulos principales que se señalan seguidamente:

- Instalación de balizas: la instalación se realiza considerando las áreas a monitorear y el diseño de acuerdo al plano CAD. Las balizas se colocan en la edificación y deben aparecer en los planos de instalaciones del edificio.
- Front end de la aplicación móvil: Es el lado de la interfaz de usuario (UI) donde el usuario recibe la ruta de evacuación de manera dinámica. Se señala la ruta segura de

evacuación a la salida de emergencia. Se pueden insertar fotografías referenciales para ayudar aún más a las personas.

- Back end de la aplicación móvil: esta parte contiene la base de datos de las balizas y los planos de la edificación. Estos planos se extraen automáticamente de la carpeta de planos de la instalación. Las fotografías, planos del edificio, planos de las balizas, se almacenan localmente en el dispositivo inteligente. El algoritmo debe calcular la ruta más corta y segura para que la persona abandone el edificio. En esta parte los sensores de incendio o rociadores activados remiten la señal de activación y su ubicación. El algoritmo seleccionado es el algoritmo A\* que ha demostrado su fiabilidad y rutas óptimas, al seleccionar la mejor ruta por la cual se desplaza el objeto. Esto es muy importante al momento de evacuar, debido a la necesidad de tener la mejor ruta en el menor tiempo posible.

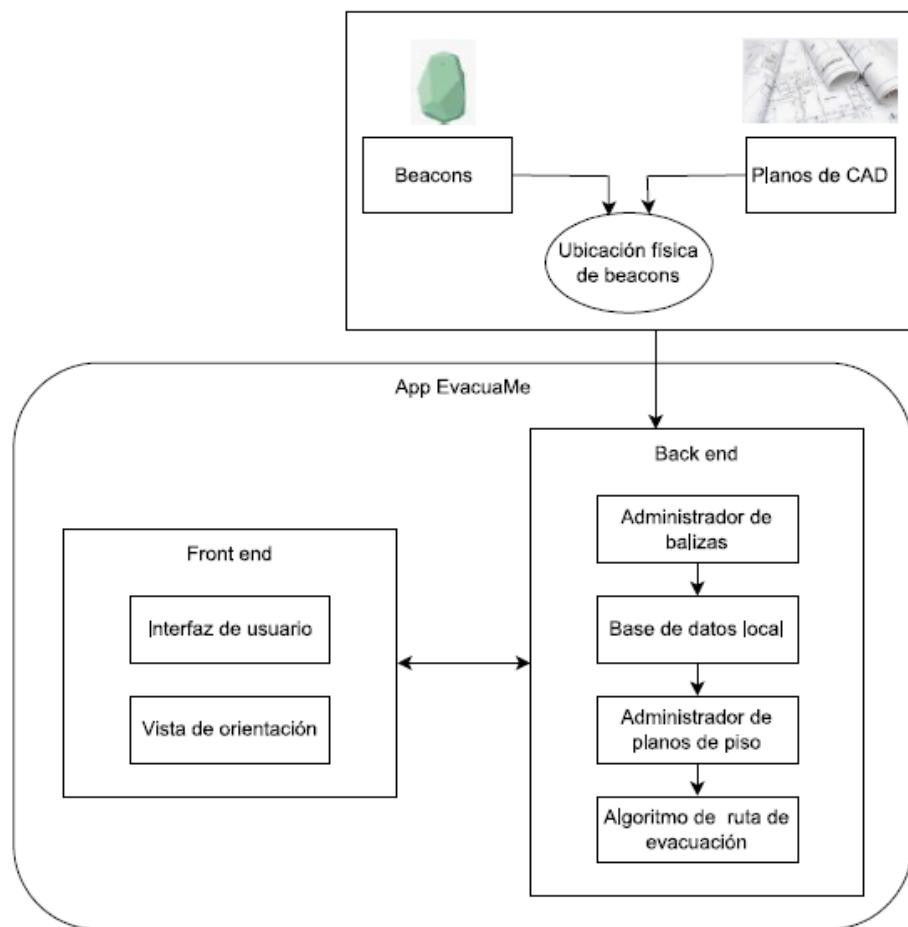
**Figura 50.** Diagrama de uso de aplicación.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

En el siguiente esquema se representa la arquitectura de la aplicación móvil, por darle un nombre EvacuaMe. Se señala a la interacción entre los datos de beacons y planos y los componentes del back end y del front end.

**Figura 51.** Propuesta de arquitectura de App EvaacuaMe.



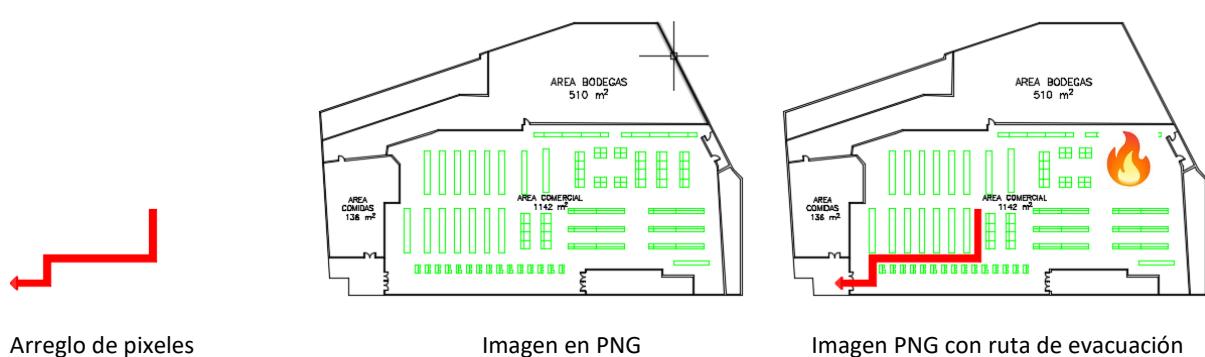
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Cuando la aplicación EvacuaMe se ejecuta, busca automáticamente una baliza. Al momento de intersecar la baliza, el Administrador de baliza devuelve los datos de la baliza encontrada (el UUID, Major value y Minor value) estos datos pasan posteriormente a ser la ubicación actual de dispositivo y por consiguiente de la persona.

Posteriormente, se ejecuta la consulta a la base de datos y devuelve la ubicación actual y la ubicación de las salidas de emergencia. Se invoca al Administrador de mapas para acceder a los planos de la edificación por piso.

El algoritmo que se ejecuta devuelve la ruta más corta y se presenta la vista de orientación en el plano o mapa. Mientras el usuario se desplaza, la aplicación continúa buscando otras balizas con la finalidad de mantener actualizada la ubicación actual.

**Figura 52.** Proceso de configuración de la imagen del mapa de cada piso.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 4.4.14. Simulación de evacuación.

Se ha escogido una ocupación mercantil, debido a que es uno de los lugares donde mucha gente acude a realizar compras, con niños o personas mayores y por la cantidad de gente en temporadas de compras, puede ocasionar que algunas se pierdan dentro de un local de gran área, con distractores y no puedan ubicarse con facilidad.

De acuerdo a la RTQ 5: Medios de egreso, una ocupación debe poseer un número máximo de personas en el interior dependiendo del tipo de ocupación que posea la edificación. Para el caso de este análisis, la carga de ocupantes CO se calcula dividiendo el área bruta en  $m^2$  para el factor de carga de ocupantes que es  $2.8\ m^2 / \text{persona}$  para el caso de una ocupación mercantil. El área del supermercado (ocupación mercantil) el área bruta es de  $950m^2$ , con lo que se tiene que la  $CO = 338$  personas. Adicionalmente, la RTQ 3 Prevención de incendios: Reglas técnicas en función del riesgo derivado del destino u ocupación de la edificación, establecimiento o local o de la actividad que se realiza en ellos, señala que la distancia máxima a los medios de egreso debe ser de 45 metros para estas ocupaciones mercantiles.

#### 4.4.14.1. Simulador de Evacuación.

Lo que se persigue con la implementación de la propuesta de la aplicación EvacuaMe, es reducir en un 40% el tiempo de las personas para encontrar la salida de emergencia.

Esto se va a comprobar mediante el empleo de un simulador de evacuación de personas. Para este fin se selecciona la versión de prueba por 30 días del simulador Pathfinder. Este simulador permite parametrizar a los ocupantes para que puedan buscar la salida más cercana, mientras evitan a otras personas y los obstáculos que pueden existir como perchas, puestos de venta

de alimentos, cajas registradoras, etc. Para conseguir la simulación se realizaron los siguientes pasos:

- Elaborar el plano de la implantación en 3D. Para esto se empleó el programa AutoCad de Autodesk.
- Importar el plano a la interface de trabajo del programa Pathfinder.
- Establecer las puertas que pueden ser utilizadas como salidas de emergencia. En este caso se van a ir variando su apertura para simular que fueron reconocidas como salidas por las personas, esto debido a que como se explicó anteriormente, las personas tienden a reconocer como salida la puerta por la que ingresaron al establecimiento.
- Definir los parámetros de los usuarios. Se establecieron 2 perfiles: cliente y cajero.
- Ejecutar el simulador y exportar los resultados. Al terminar de correr el simulador se pueden obtener las gráficas de tiempos de evacuación en general y de flujo de personas por cada salida.

**Figura 53.** Simulación de egreso de personas con el software Pathfinder.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 4.4.14.2. Resultados del simulador de evacuación.

Para la simulación se analizaron tres escenarios:

- *Escenario 1.* Las personas reconocen como única salida la entrada por la que ingresaron al supermercado. Es el comportamiento más esperado el momento de realizar una evacuación.

- *Escenario 2.* Algunas personas reconocen otras salidas para evacuar aparte de la puerta de ingreso al local. Puede ser que algunas personas reconozcan por la señalética alguna salida de emergencia y acudan a ella para salir del edificio. Pueden utilizar 1 o 2 salidas adicionales que hayan podido reconocer.
- *Escenario 3.* Las personas son dirigidas a las salidas de emergencias en función de su cercanía y rapidez para evacuar. Este comportamiento simulado se asemeja a cuando las personas empleen la aplicación EvacuaMe pues les permitirá dirigirse a la salida más cercana aun cuando no la hayan reconocido al ingresar en el local o no se hayan fijado en el mapa de riesgos, recursos y evacuación.

Para los tres escenarios se va a suponer que el aforo es de 310 personas, que correspondería a un día de ocupación de fin de semana.

Luego de la simulación se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 11. Resultados de la evacuación simulada.**

Escenario	Cantidad de salidas utilizadas	Aforo (No personas)	Tiempo de evacuación (s)
1	1	310	247
2	2	310	152
2	3	310	145
3	4	310	91

Fuente: Elaboración Propia. 2022.

De los resultados se concluye que existe una disminución del 63% en el tiempo de evacuación entre el escenario 1 que correspondería a una evacuación sin ayuda de beacons, y el escenario 4 que correspondería a la evacuación guiada con beacons.

En el anexo 2 se muestran los gráficos de los resultados de las evacuaciones para los 3 escenarios.

#### 4.4.15. Presupuesto para implementación.

Tomando en cuenta la necesidad de implementar MRREI, se plantea un presupuesto para implementar el sistema utilizando beacons y desarrollando una aplicación que pueda ser utilizada en dispositivos con sistema Android y iOS.

Para el caso de la implementación, se va a tomar como escenario un establecimiento con ocupación mercantil con un área de 2000 m<sup>2</sup>, similar al caso del supermercado Ycuá Bolaños analizado en el estado del arte.

En este caso, al ser una ocupación de uso mercantil, la implementación de las balizas, adicionalmente a ser utilizadas en el marketing one to one con los usuarios, va a ser utilizada en el caso de emergencias para enviar a los clientes la ruta de evacuación más corta a la salida de emergencia el local. Todo esto considerando que las puertas de las salidas de emergencia se encuentran libres para ser abiertas desde dentro del local.

**Tabla 12. Presupuesto de la propuesta de implementación.**

Descripción	Presupuesto		
	Cantidad	Valor unitario (Euros)	Valor total (Euros)
Beacons	37 unidades	36	1.332,00
Configuración de beacons	40 horas	20	800,00
Calibración de beacons	32 horas	25	800,00
Instalación de beacons	64 horas	35	2.240,00
Diseño gráfico aplicación	40 horas	40	1.600,00
Desarrollo e integración con MRREI	80 horas	50	4.000,00
Desarrollo aplicación en Android	80 horas	45	3.600,00
Desarrollo aplicación en iOS	96 horas	45	4.320,00
<b>TOTAL</b>			<b>18.692,00</b>

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

## 5. Conclusiones y trabajos futuros

### 5.1. Conclusiones.

En la introducción del TFM se establece que la finalidad primordial de los sistemas de prevención de incendios es salvar vidas, esto se puede conseguir anunciando de manera temprana la presencia de un incendio de tal manera que las personas puedan evacuar de manera segura y a tiempo. Para esto se ha propuesto el diseño de un sistema de evacuación mediante una aplicación móvil y la utilización de beacons o balizas con tecnología BLE. Adicionalmente, se explica la arquitectura IoT que se va a emplear, así como, la arquitectura de la aplicación móvil propuesta, y se realiza la simulación de evacuación considerando tres escenarios posibles de evacuación.

Por lo señalado en el estudio del arte, se observa que a pesar de que existe un gran desarrollo en la automatización en algunas áreas de la industria, todavía ocurren incendios con gran cantidad de pérdidas humanas en sitios de concentración masiva. La utilización de las tecnologías de la Industria 4.0 han aportado en gran medida en el diseño y mantenimiento de los sistemas de prevención de incendios mediante la utilización de IoT, Ciberseguridad, fabricación aditiva y análisis de datos.

Las contribuciones principales obtenidas luego de la realización del presente Trabajo de Fin de Master son las siguientes:

1. Se han explicado diferentes tecnologías de Industria 4.0 que se aplican a los sistemas de prevención de incendios como son: Ciberseguridad, Fabricación Aditiva, Realidad Aumentada y Virtual, IoT, sensores inteligentes, Inteligencia Artificial. Como se indica en el capítulo 4, luego de explicar los componentes de los mapas de riesgos, recursos y evacuación, se propone el diseño de un sistema que guíe a las personas a la salida más cercana a nivel de hardware, software y finalmente un presupuesto estimado.
2. Como se expone en el capítulo 4.4, se ha propuesto el diseño de un sistema de evacuación guiado por beacons y con una aplicación móvil.
3. Finalmente, se ha realizado la simulación de evacuación de las personas dentro de un edificio considerando 3 escenarios posibles y, en uno de ellos, simulando que las personas son guiadas hacia las salidas mediante el empleo de los beacons y la aplicación móvil.

Con la simulación de la evacuación se observa que el guiar a las personas de manera clara hacia las salidas de emergencia, reduce los tiempos de salida del edificio y aumenta la probabilidad de sobrevivir ante el caso de tener un incendio dentro del edificio analizado.

Luego de presentar los resultados alcanzados, se demuestra que los objetivos específicos planteados en el apartado 3 se han conseguido:

- Determinar las causas de los incendios más significativos a nivel mundial y el rol que tuvieron los sistemas de prevención de incendios convencionales. Este objetivo se considera cumplido ya que tal y como se explicó en el capítulo 2, se consideraron y analizaron los incendios que han dejado mayor cantidad de víctimas en Latinoamérica, analizando como ocurrieron los incendios y que papel tuvieron los sistemas contra incendios que poseían instalados.
- Establecer las mejoras en la operación de los dispositivos para prevenir incendios con tecnologías de Industria 4.0. Este objetivo se encuentra alcanzado ya que tal y como se indica en el capítulo 2.5 y 2.6 se explica como la normativa actualizada apoya a la consecución de sistemas de prevención de incendios más seguros e inteligentes.
- Comparar las ventajas y de aplicar las tecnologías de Industria 4.0 respecto a las soluciones convencionales. Este objetivo está cumplido tal y como se presenta en el capítulo 4 al señalar las ventajas de emplear dispositivos IoT para la evacuación de las personas de un lugar en caso de incendio u otro evento antrópico. De la misma manera, se explica en el capítulo 2.7 las ventajas de aplicar tecnologías 4.0 en sistemas de prevención de incendios.

Finalmente, se puede concluir que el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Master que es el de Investigar la aplicación de las tecnologías de Industria 4.0 en los sistemas de prevención de incendios, ha sido alcanzado indiscutiblemente luego de realizar la correspondiente investigación de tecnologías que actualmente se emplean para salvar vidas y proteger los bienes de los incendios, y al final proponer un sistema de evacuación utilizando estructura y componentes IoT.

## 5.2. Trabajos Futuros.

Este trabajo sirve como una base sólida para la utilización cada vez más de la automatización en los procesos de evacuación de las personas, no sólo en caso de incendio, sino también ante

cualquier otro evento antrópico. El tener la información para poder decidir qué hacer en los casos de emergencia, es una herramienta muy útil para seguir mejorando los sistemas de prevención de incendios. En este sentido, se plantean algunos temas para poder seguir mejorando la utilización de los mapas de riesgos, recursos y evacuación inteligentes:

1. Incorporar la ubicación y monitorización del estado en tiempo real de los recursos de extinción de incendios como son los extintores portátiles. En las inspecciones realizadas, se observa que un porcentaje alto no se encuentra con el mantenimiento anual exigido por la normativa vigente y, en caso de que se requieren utilizar, no estarían operativos debido a que se encuentran sin presión o el agente extintor perdió su efectividad.
2. En el caso de atrapamientos de personas en lugares que han colapsado, los beacons pueden ayudar a determinar cuál es la última posición registrada e iniciar las labores de rescate en esa zona.
3. A partir de las simulaciones realizadas con el software Pathfinder, se pueden incorporar mejoras en cuanto al acceso a las salidas para evacuar de manera guiada, es decir, una vez activada la alarma de evacuación, la señalética puede guiar de manera inteligente a las personas a la salida, modificando de acuerdo a la necesidad, la dirección de evacuación para aumentar sus probabilidades de supervivencia.
4. Utilizar la analítica de datos para mejorar los medios de egreso: ancho, alto, capacidad de flujo, en función de la cantidad de personas que asisten al establecimiento.

## Referencias bibliográficas

- 1library.co. (2022). *Seguridad y gestión de una red de beacons*. Recuperado el 23 de junio de 2022 de: <https://1library.co/document/yeo967eq-seguridad-y-gestion-de-una-red-de-beacons.html>.
- Ahrens, M., y Evarts, B. (2021). *Fire loss in the United States during 2020*. Nfpa.Org. Recuperado el 14 de abril de 2022 de: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/US-Fire-Problem/osFireLoss.pdf>
- Ahmed, H., y Alomgir, M. (2021). “*An automated IOT Based Fire Detection & Safety Control for Garments industry in Bangladesh: A-Study*,” 2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI), 2021, pp. 1-5, [doi: 10.1109/ACMI53878.2021.9528094](https://doi.org/10.1109/ACMI53878.2021.9528094).
- Ahrens, M. (2021). *Smoke alarms in US home fires*. Nfpa.Org. Recuperado el 15 de mayo de 2022 de: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Detection-and-signaling/ossmokealarms.pdf>
- Álvarez, E., y Moncada, J. (2014). *El Incendio del Supermercado Ycuá Bolanos*. NFPA JLA | NFPA en Español | Journal Latinoamericano | Organización de protección contra incendios. Recuperado el 02 de mayo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/archivos/edicion-impresa/lugares-de-reuniones-publicas-discotecas/986-el-incendio-del-supermercado-ycua-bolanos>
- Arul, A., Hari Prakaash, R. S., Gokul Raja, R., Nandhalal, V., y Sathish Kumar, N. (2021). *Fire detection system using machine learning*. Journal of Physics. Conference Series, 1916(1), 012209. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1916/1/012209>.
- Arce, J., (2008). *Grandes incendios urbanos: Mesa Redonda, Lima 2001*. SciELO - Scientific Electronic Library Online. Recuperado el 03 de mayo de 2022 [https://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-46342008000100014](https://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342008000100014)
- Athanasis, N., Themistocleous, M., Kalabokidis, K., Papakonstantinou, A., Soulakellis, N., Palaiologou, P. (2018). The emergence of social media for natural disasters management: A big data perspective. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and*

*Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42(3W4), 75-82.* Recuperado el 21 de mayo de 2022 de: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-75-2018>

Bao, X. (2021). *Fire equipment information traceability system based on blockchain.* E3S Web of Conferences, 251, 03099. Recuperado el 11 de abril de 2022 de: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125103099>.

BBC News. (2022). *Dehui poultry plant fire: Locked exits 'blocked escape'.* Recuperado el 02 de mayo de 2022 de: <https://www.bbc.com/news/world-asia-china-22749938>.

Bliss, D. P. (2016). *Datos masivos, datos globales.* Nfpajla.org; NFPA - JLA. Recuperado el 27 de marzo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/archivos/exclusivos-online/manejo-deemergencias-materiales-peligrosos/1186-datos-masivos-datos-globales>

Bomberos Guayaquil. (2022). *Indicadores de gestión del 2021.* Gob.Ec. Recuperado el 02 de abril de 2022 de: <https://www.bomberosguayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/2021/04/rendicion-de-cuentas-2020.pdf>

Bluumi (2022). *¿Qué son los beacons? ¿Qué beneficios tiene para tu empresa?.* Recuperada el 23 de junio de 2022 de: <https://bluumi.net/que-son-los-beacons/>

Chaudhary, A., y Rabeja, S. (2014). *An Edge Detection Approach for Flame and Fire Images in Image Processing Using Bacterial Foraging Algorithm.* International Journal of Engineering and Technical Research. [https://www.researchgate.net/publication/357992350\\_An\\_Edge\\_Detection\\_Approach\\_for\\_Flame\\_and\\_Fire\\_Images\\_in\\_Image\\_Processing\\_Using\\_Bacterial\\_Foraging\\_Algorithm](https://www.researchgate.net/publication/357992350_An_Edge_Detection_Approach_for_Flame_and_Fire_Images_in_Image_Processing_Using_Bacterial_Foraging_Algorithm)

Chen, Jeff (2018). *Data science.* Recuperado el 21 de mayo de 2022 de: <https://www.jeffchen.org.s3-website-us-east-1.amazonaws.com/datascience.html>

Crosley, B., y Ligabo, Y. (2020). *“Fire and Gas Safety Systems in Industry 4.0.”*, Tockwell Automation. <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/digital-tools-help-increase-fire-and-gas-safety.html>

Cuwhois.com. (2022). *¿Cuántos sensores tiene tu Smartphone?.* Recuperada el 23 de junio de 2022 de: <https://www.cuwhois.com/tecnologia/cuantos-sensores-tiene-tu-smartphon>.

FAO and UNEP, (2020). *The State of the World’s Forests 2020. Forests, biodiversity and people.* Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>

FAO y PNUMA (2020). El estado de los bosques del mundo - *Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Roma. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca8642es>

Ferreira, J. C., Resende, R., & Martinho, S. (2018). Beacons and BIM Models for Indoor Guidance and Location. Sensors (Basel, Switzerland), 18(12), 4374. <https://doi.org/10.3390/s18124374>

Firesafeeurope (2022). *Fire safety: Know the facts*. firesafeeurope.eu. Recuperado el 2 de abril de 2022 de: <https://firesafeeurope.eu/facts-figures/>

Garg, S., Aryal, J., Wang, H., Shah, T., Kecskemeti, G., y Ranjan, R. (2018). *Cloud computing based bushfire prediction for cyber-physical emergency applications*. Future Generations Computer Systems: FGCS, 79, 354–363. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.02.009>

Geoffoy, L., Samyn, F., Jimenez, M., y Bourbigot, S. (2019). *Additive manufacturing of fire-retardant ethylene-vinyl acetate*. Recuperado el 26 de mayo de 2022 de: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02165588/>

Guamantario, Wilson (2018). *Influencia de los parametros de relleno en el comportamiento mecanico a la flexion de piezas fabricadas en impresoras 3d de bajo Coste*. <https://docplayer.es/55379463-Influencia-de-los-parametros-de-relleno-en-el-comportamiento-mecanico-a-la-flexion-de-piezas-fabricadas-en-impresoras-3d-de-bajo-coste.html>

INMA (2021). *Clase de 2022*. Ingenieros Mecánicos Asociados - INMA S.A.S. Recuperado el 5 de mayo de 2022 de <https://www.inma.com.co/clase-de-2022/>

Longley, C. (2021). *¿Como se mantienen las normas de la NFPA al ritmo de la innovación?*. Nfpajla.org; NFPA - JLA. Recuperado el 28 de marzo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/blog/2003-como-se-mantienen-las-normas-de-la-nfpa-al-ritmo-de-la-innovacion>.

Mahoney, S. (2021). *Ciberseguridad Y NFPA 72 2022*. Nfpajla.org; NFPA - JLA. Recuperado el 28 de marzo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/archivos/edicionimpresa/alarma-deteccion-senalizacion/1980-ciberseguridad-y-nfpa-72-2022>

McKelvey, S. (2021). *A medida que se hacen más comunes las inspecciones remotas*, NFPA incluye Una sesión de Una hora abordando sus posibilidades, ventajas Y riesgos

potenciales. Nfpajla.org; NFPA - JLA. Recuperado el 28 de marzo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/blog/1883-amedida-que-se-hacen-mas-comunes-las-inspecciones-remotas-nfpa-incluye-una-sesion-de-una-horaabordando-sus-posibilidades-ventajas-y-riesgos-potenciales>

Moncada, J. A., (2014). *El beso de la muerte*. Nfpajla.org; NFPA - JLA. Recuperado el 27 de marzo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/archivos/edicion-impresa/lugares-de-reuniones-publicas-discotecas/993-el-beso-de-la-muerte>.

Moncada, J. A. (2005). *¿Cuán grave es el problema de seguridad contra incendios en Latinoamérica?*. Com.ar. Recuperado el 27 de marzo de 2022 de: [http://www.rnds.com.ar/articulos/049/RNDS\\_180W.pdf](http://www.rnds.com.ar/articulos/049/RNDS_180W.pdf)

Mocada, J. A., (2014). *Lecciones de Comayagua*. Nfpajla.org; NFPA - JLA. Recuperado el 06 de mayo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/archivos/edicion-impresa/lugares-de-reuniones-publicas-discotecas/756-lecciones-de-comayagua>

National Fire Protection Association (2022). *Código Nacional de Alarmas de Incendio y Señalización*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=72>

NFPA Data Lab, (2021). *NFPA Data Lab*. Nfpajla.org. Recuperado el 02 de abril de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/NFPA-Data-Lab>

Nitin, J. (2017). *Fire Protection 4.0. How IoT shall transform Fire Protection Industry, TechnologiesPvT Ltda.*

Observatorio de prevención de riesgos y accidentes. (2022). *Los diez incendios con más muertes de 2021 - OBSERVATORIO DE PREVENCIÓN DE RIESGOS Y ACCIDENTES*. [online] Recuperado el 02 de mayo de 2022 de: <https://opra.info/los-diez-incendios-con-mas-muertes-de-2021/>

Pages.silabs.com. (2022). Recuperado el 23 de junio de 2022 de: <https://pages.silabs.com/rs/634-SLU-379/images/Whitepaper-Developing-Beacons-with-Bluetooth-Low-Energy-Technology.pdf>.

Regla Técnica Metropolitana. (2021). RTQ 1/2021. Ordenanza Metropolitana N° 001 Código Municipal para el Distrito Metropolitano de Quito.  
<https://www.bomberosquito.gob.ec/images/stories/rtq1.pdf>

Reglamento de Prevención, Mitigación y Protección Contra Incendios. Acuerdo Ministerial 1257 Registro Oficial Edición Especial 114 de 02-abr.-2009.  
<https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2019-11/REGLAMENTO DE PREVENCION%2C MITIGACION Y PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS.pdf>

Rieland, R. (2015). *How data and a good algorithm can help predict where fires will start.* Smithsonian Magazine. Recuperado el 18 de mayo de 2022 de:  
<https://www.smithsonianmag.com/innovation/how-data-and-good-algorithm-can-help-predict-where-fires-will-start-180954436/>

Rouhianen, L. (2018). *Inteligencia Artificial 101 cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro.* Editorial Alienta. [https://static0planetadelibroscom.cdnstatics.com/libros\\_contenido\\_extra/40/39308\\_Inteligencia\\_artificial.pdf](https://static0planetadelibroscom.cdnstatics.com/libros_contenido_extra/40/39308_Inteligencia_artificial.pdf)

Russell, S., y Norving, P. (2021). Artificial Intelligence A Modern Approach. Pearson.

Silabs.com. (2022). Silicon Labs. Recuperado el 22 de junio de 2022 de:

<https://www.silabs.com/>.

Still, Rick. (2014). *Fire service leaders talk data at NFPA workshop.* Verisk. Recuperado el 17 de mayo de 2022 de: <https://www.verisk.com/blog/fire-service-leaders-talk-data-at-nfpa-workshop/#mainContent>.

Solid GEAR. (2022). *Detectando beacons en Android, protocolos, usos: Eddystone.* Recuperado el 23 de junio de 2022 de: <https://ahorasomos.izertis.com/solidgear/beacons-en-android/>.

Technologies, V. (2020). *Let's Talk About Fire Protection 4.0.* Vighnaharta. Technologies Pvt. Ltd. <https://vighnaharta.in/blogs/lets-talk-about-fire-protection-4-0/>

UL. (2022). *UL y ULC advierten de marcas de UL falsificadas en extintores (Comunicado 19PN-11).* (n.d.). UL. Recuperado el 12 de abril de 2022 de: <https://www.ul.com/es/news/ul-y-ulc-advierten-de-marcas-de-ul-falsificadas-en-extintores-comunicado-19pn-11>.

Verzoni, A. (2022). *Inmersión completa*. NFPA JLA | NFPA en Español | Journal Latinoamericano | Organización de protección contra incendios. Recuperado el 07 de mayo de 2022 de: <https://nfpajla.org/archivos/edicion-impresa/bomberos-socorristas/2083-inmersion-completa>

WWF. (2020). *En 2020 los incendios forestales podrían ser peores que en 2019 para Sudamérica y el mundo*. worldwildlife.org. <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/en-2020-los-incendios-forestales-podrian-ser-peores-que-en-2019-para-sudamerica-y-el-mundo>

Yalcinkaya, G. (2018). *World's first 3D-printed steel bridge unveiled at Dutch Design Week*. Dezeen.com. Recuperado el 23 de mayo de 2022 de: <https://www.dezeen.com/2018/10/22/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-completed-mx3d-technology/#>

Zhang, X. (2021). Prediction of fire risk based on cloud computing. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1537–1544. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.008>

Ziavras, V. (2022). *Fabricación aditiva* ( impresión 3D). [online] Nfpajla.org. Recuperada el 23 de mayo de 2022 de: <https://www.nfpajla.org/blog/1845-fabricacion-aditiva-impresion-3d>.

Zou, W., Jing, W., Chen, G., Lu, Y., y Song, H. (2019). A Survey of big data analytics for smart forestry. *IEEE Access*, 7, 46621-46636. Recuperado el 21 de mayo de 2022 de: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907999>

## Anexo A. Especificaciones de beacons

# iBKS Plus Datasheet

## ABSTRACT

iBKS Plus Technical Data



## AUDIENCE

This document is primarily focused for engineers or other users with a Technical profile

## FEATURES

- Advertising Beacon Device
- Bluetooth Low Energy®
- Full Eddystone & iBeacon compatible
- 100% Configurable Parameters
- Firmware update Over The Air (OTA)
- Dust & Waterproof performance: IP67 Certified
- External button to enable/disable and configure with a status LED
- Provided with your own configuration (MOQ 50 units)
- Screws/ flanges/ sticker for deploying
- Additional optional sensors available
- FCC & CE Certifications

Revision 6 | March 2018



## 1. Specifications

This section contains electrical, mechanical and software specifications for iBKS Plus

Dimensions	84 x 84 x 24 mm	Case material	ABS
Weight	153g (Lithium) 182g (Alkaline)	Case finish	Matte white
Core	Nordic nRF51822	Button material	TPU
Radio Protocol	Bluetooth® Low Energy	Button finish	Matte black
Distance Range	Up to 100m	Fixing method	Double side sticker Screws Flanges
Battery	4 AA size	Operating Temperature	Related to battery type (see below)
Optional Sensors	Hall Accelerometer Temperature	Storage Temperature	Related to battery type (see below)
Firmware Update	OTA (Over The Air)	Beacon Protocols	iBeacon Eddystone: UID, URL, TLM & BD
Idle Current Consumption	3.5 to 3.8µA	Certifications	FOC, CE & IP67

### Alkaline Battery

Battery Type	4 AA - 1.5V - 2700mAh	Operating Temperature	-20 to +54°C
Total Capacity	3V - 5400mAh	Storage Temperature	5 to 30°C

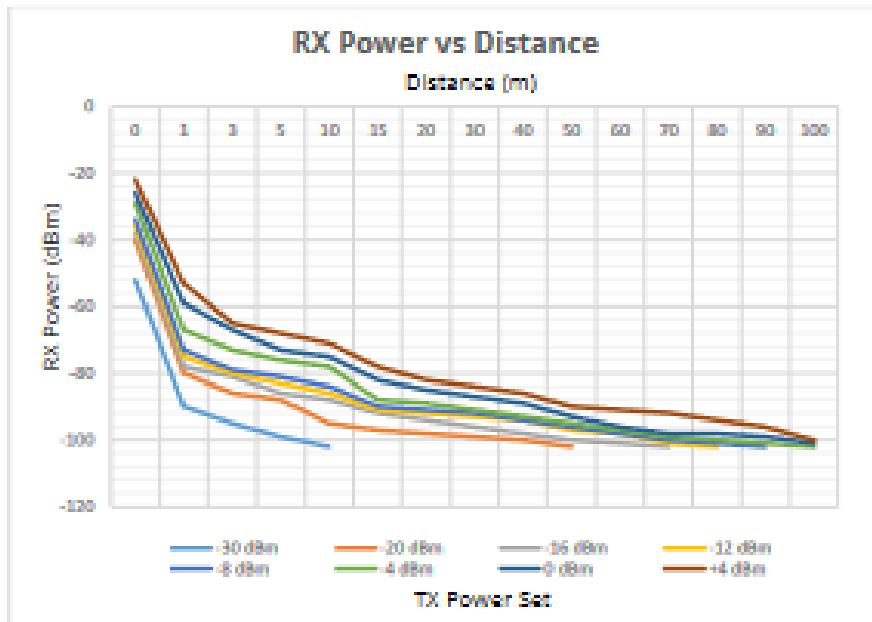
### Lithium Battery

Battery Type	4 AA - 3.6V - 2600mAh	Operating Temperature	-40 to +85°C
Total Capacity	3.6V - 10400mAh	Storage Temperature	5 to 30°C

## 5. RX Power (dBm) vs Distance

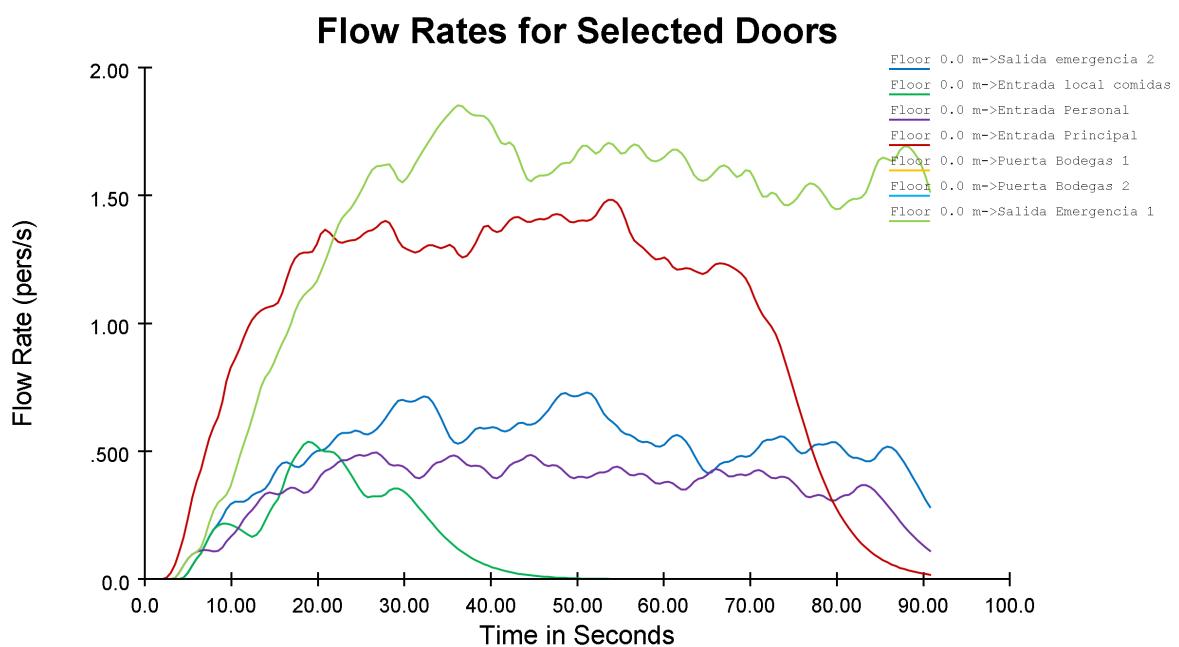
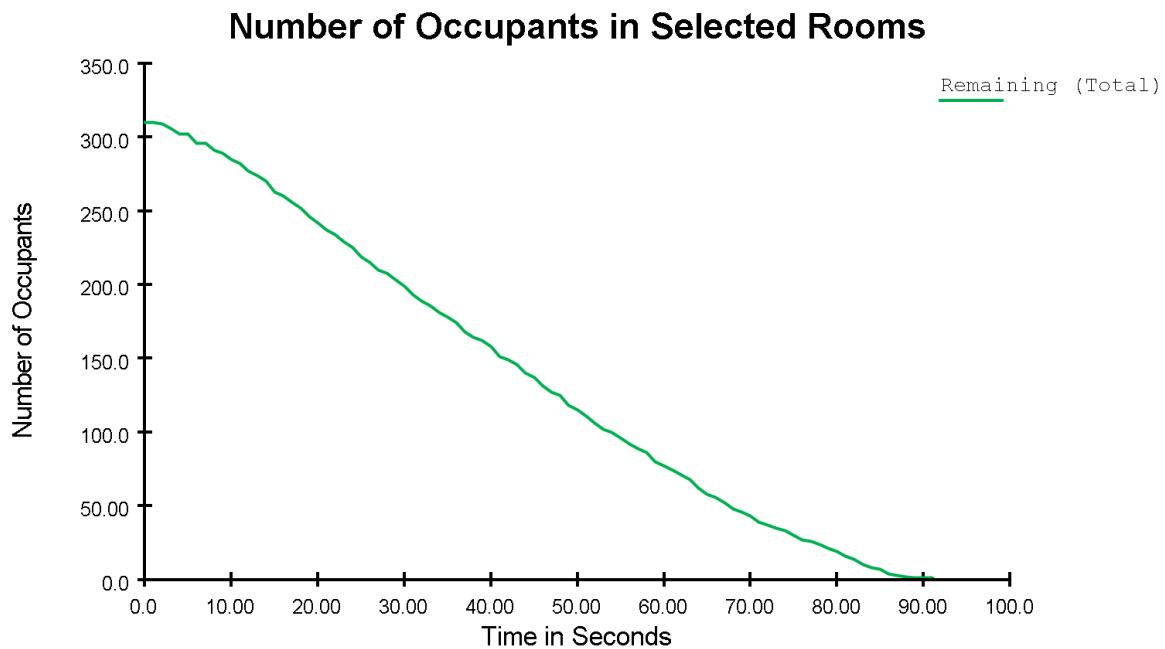
The following table and graph show the RX power received (dBm) in comparison with distance (m) for all configurable TX powers.

Distance (m)	TX Power (dBm)								
	-30	-20	-16	-12	-8	-4	0	+4	
0	-92	-40	-38	-36	-34	-29	-26	-22	
1	-90	-80	-78	-75	-73	-67	-69	-69	
3	-95	-86	-81	-80	-79	-73	-67	-65	
5	-99	-88	-86	-83	-81	-76	-73	-68	
10	-102	-95	-88	-86	-84	-78	-75	-71	
15		-97	-92	-91	-90	-88	-82	-78	
20		-98	-94	-92	-91	-89	-85	-82	
30		-99	-96	-93	-92	-91	-87	-84	
40		-100	-98	-94	-94	-93	-89	-86	
50		-102	-100	-97	-96	-95	-93	-90	
60			-101	-98	-98	-97	-96	-91	
70				-102	-101	-100	-99	-98	
80					-102	-101	-100	-98	
90						-102	-101	-99	
100							-102	-101	



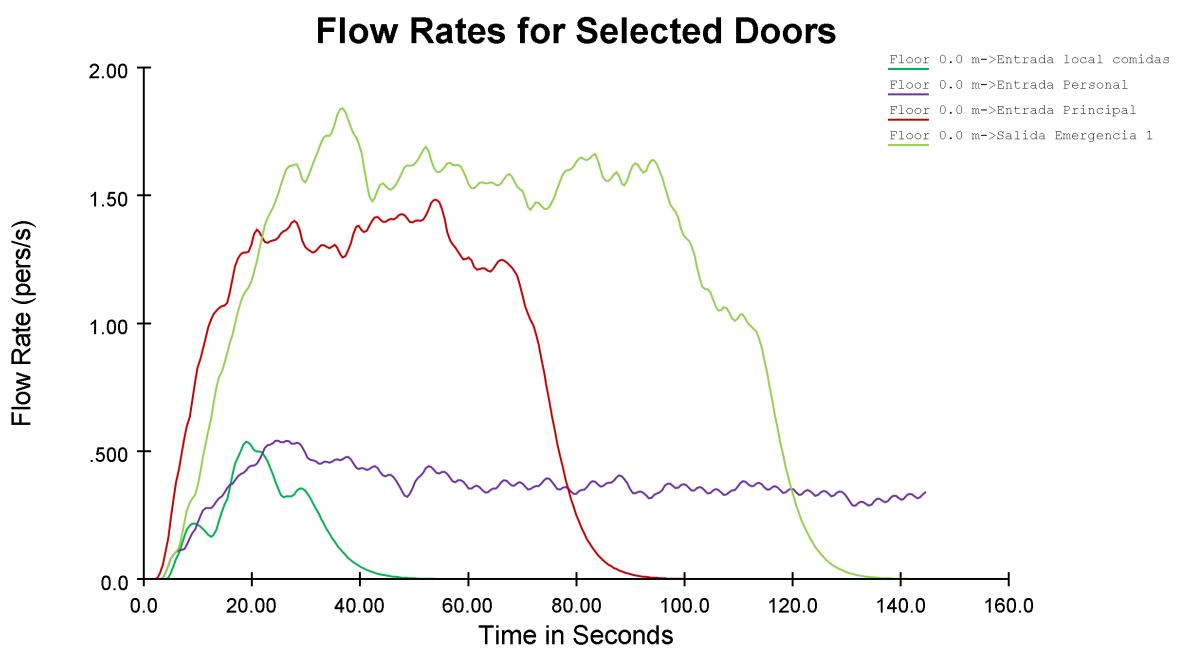
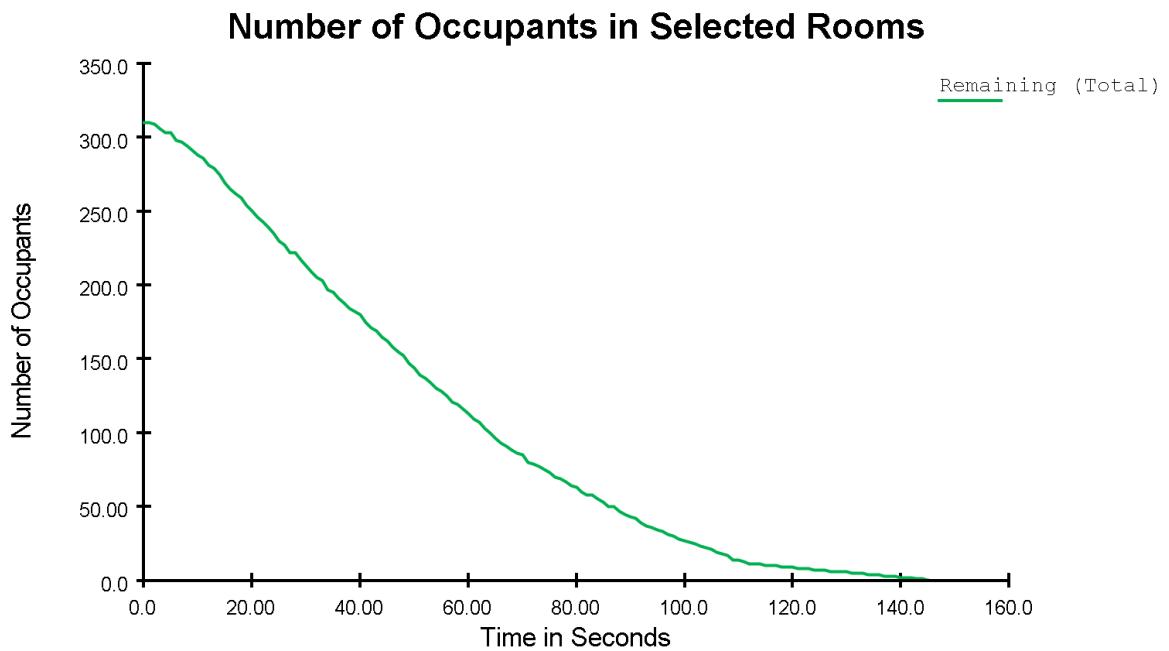
## Anexo B. Resultados de la simulación en Pathfinder.

**Aforo:** 310 personas. **Tiempo de evacuación:** 91.3 segundos. **Escenario:** 4 salidas identificadas.



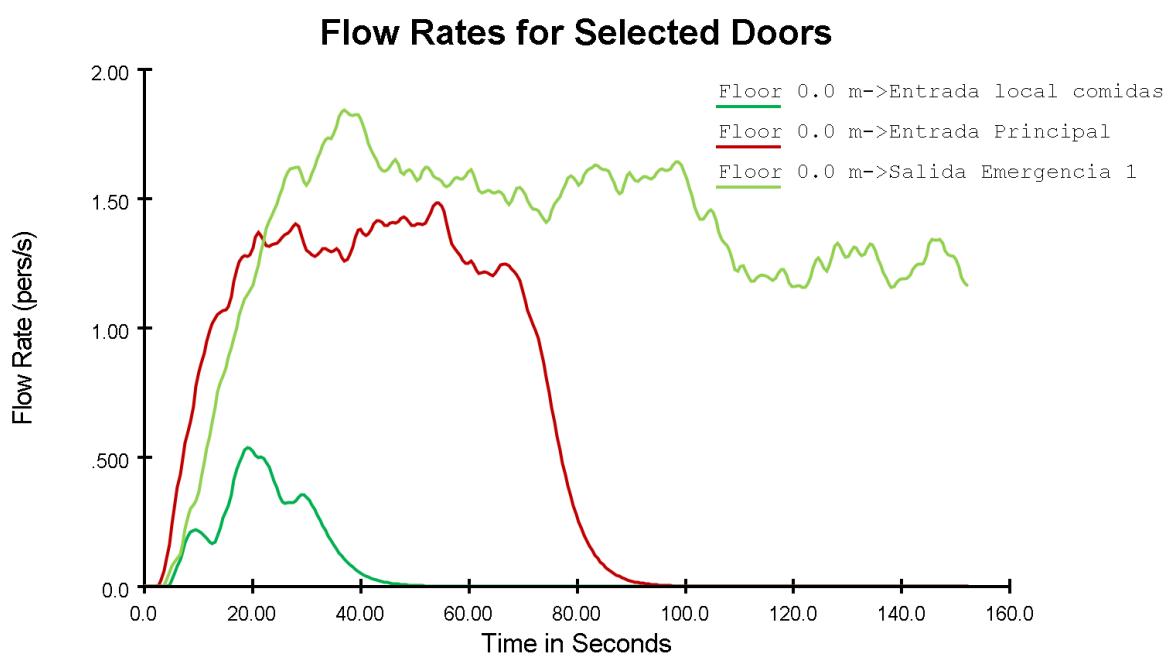
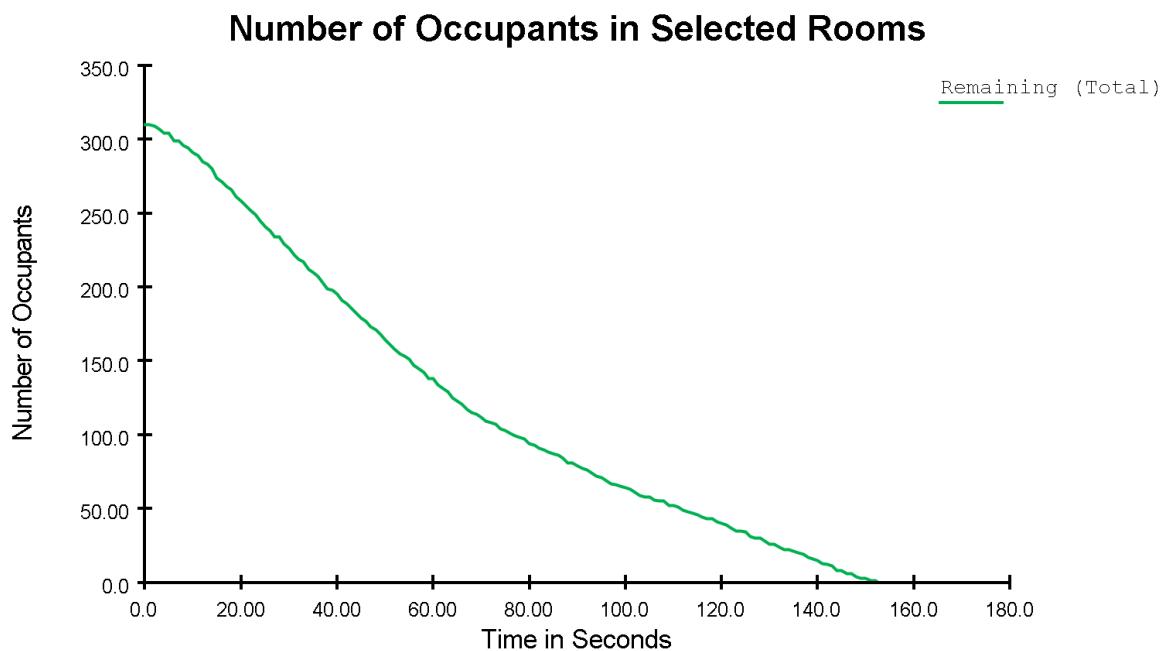
La simulación se puede observar en el siguiente link: <https://vimeo.com/723404835>

**Aforo:** 310 personas. **Tiempo de evacuación:** 145 segundos. **Escenario:** 3 salidas identificadas.



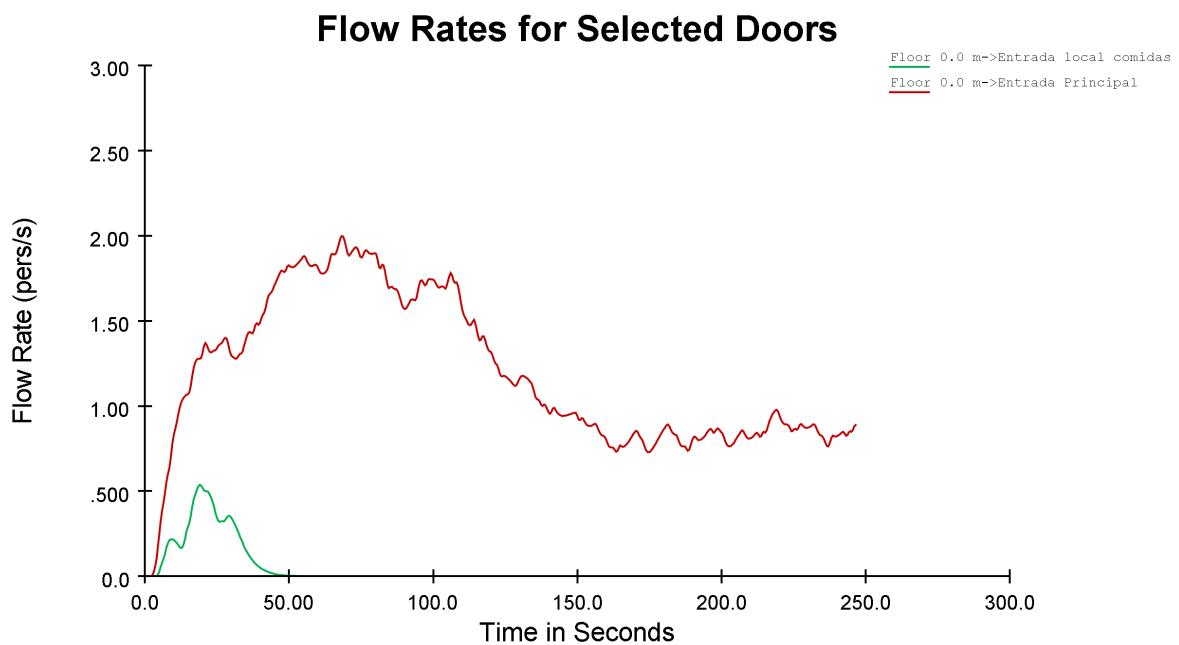
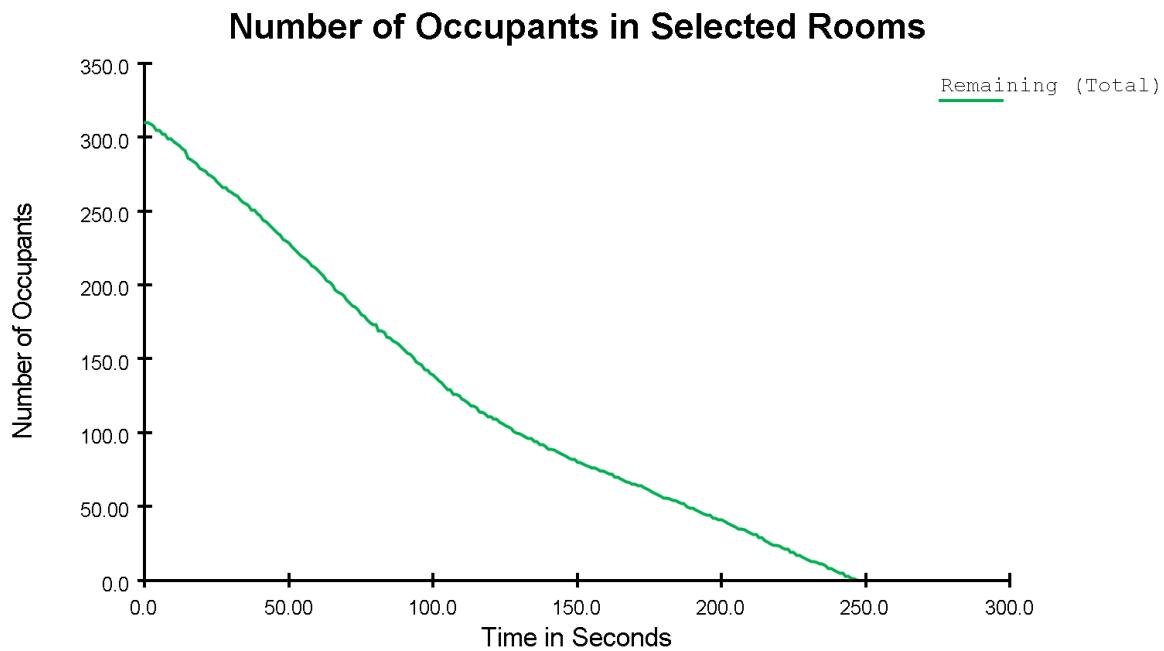
La simulación se puede observar en el siguiente link: <https://vimeo.com/723403023>

**Aforo:** 310 personas. **Tiempo de evacuación:** 152 segundos. **Escenario:** 2 salidas identificadas.



La simulación se puede observar en el siguiente link: <https://vimeo.com/723400987>

**Aforo: 310 personas. Tiempo de evacuación: 247 segundos. Escenario: 1 salida identificada.**



La simulación se puede observar en el siguiente link: <https://vimeo.com/723398724>

## Anexo C. Algoritmo A\*.

```
// A* Search Algorithm
1. Initialize the open list
2. Initialize the closed list
    put the starting node on the open
    list (you can leave its f at zero)

3. while the open list is not empty
    a) find the node with the least f on
        the open list, call it "q"

    b) pop q off the open list

    c) generate q's 8 successors and set their
        parents to q

    d) for each successor
        i) if successor is the goal, stop search

        ii) else, compute both g and h for successor
            successor.g = q.g + distance between
            successor and q
            successor.h = distance from goal to
            successor (This can be done using many
            ways, we will discuss three heuristics-
            Manhattan, Diagonal and Euclidean
            Heuristics)

            successor.f = successor.g + successor.h

        iii) if a node with the same position as
            successor is in the OPEN list which has a
            lower f than successor, skip this successor

        iv) if a node with the same position as
            successor is in the CLOSED list which has
            a lower f than successor, skip this successor
            otherwise, add the node to the open list
        end (for loop)

    e) push q on the closed list
end (while loop)
```