



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DE SEGURIDAD HUMANA BASADO EN
DESEMPEÑO EN CASO DE INCENDIO DEL
EDIFICIO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

como parte de los requisitos para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA CON ÉNFASIS EN SISTEMAS
DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS


Michael Alcázar Fallas
Luis Roberto Bolaños Esquivel
Silvio Alberto García Aguirre


Sede Interuniversitaria de Alajuela

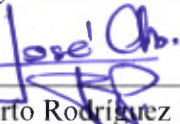
Febrero, 2019

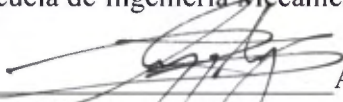
Hoja de tribunal

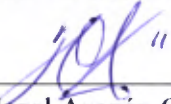
Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica con Énfasis en Sistemas de Protección Contra Incendios.

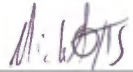

Director de la Unidad Académica
Mag. Jhymer Rojas Vásquez
Director Escuela de Ingeniería Mecánica


Asesor director
Mag. Luis Flores Quirós
Escuela de Ingeniería Mecánica


Asesor interno
Lic. José Alberto Rodríguez Porras
Escuela de Ingeniería Mecánica


Asesor externo
Mag. Mauricio Meneses Flaque
Salvavidas de Centroamérica S.A.


Docente curso Proyecto II
Mag. Hazel Aragón O'conor
Escuela de Ingeniería Mecánica


Ponente
Michael Alcázar Fallas


Ponente
Luis Roberto Bolaños Esquivel


Ponente
Silvio Alberto García Aguirre

Índice general

Hoja de tribunal	ii
Índice de Anexos	vi
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Cuadros	x
Siglas.....	xii
Resumen.....	xiii
1. Introducción.....	14
1.1. Descripción General.....	14
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo general.....	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. Justificación.....	16
1.4. Antecedentes	17
1.5. Metodología	19
1.6. Alcance y limitaciones	20
2. Marco teórico.....	24
2.1. Fundamentos de dinámica del fuego.....	24
2.1.1. Definición del fuego	24
2.1.2. Clases de fuego	25
2.1.3. Etapas de un incendio	25
2.1.4. Fenómenos presentes en un incendio.....	27
2.1.5. Generación de calor	29
2.2. Análisis basado en desempeño para protección contra incendios.....	31
2.2.1. Introducción al análisis basado en desempeño	32
2.2.2. Tipos de análisis por desempeño	32
2.3. Seguridad humana.....	34
2.3.1. Comportamiento humano en caso de emergencia	36

2.3.2.	Proceso de evacuación y RSET	36
2.3.3.	Comportamiento del ambiente y ASET.....	41
2.4.	Análisis del riesgo	46
2.4.1.	Criterio NFPA 101: Código de Seguridad Humana	46
2.4.2.	Criterio SFPE.....	47
2.4.3.	Estadística del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.	48
2.5.	Etapas del proceso de análisis por desempeño.....	48
2.5.1.	Definición del alcance del proyecto.....	50
2.5.2.	Identificar metas	51
2.5.3.	Definir objetivos	52
2.5.4.	Desarrollo del criterio por desempeño.....	53
2.5.5.	Desarrollo de los escenarios de fuego y los incendios de diseño	54
2.5.6.	Desarrollo de los escenarios de prueba.....	55
2.5.7.	Informe de diseño	55
2.6.	Sistemas de detección, supresión de incendios y compartimentación	59
2.6.1.	Tipos de sistemas	59
2.6.2.	Sistemas de supresión	59
2.6.3.	Sistemas de detección y alarma	62
2.6.4.	Compartimentación contra incendios	63
2.7.	Modelos de simulación de incendios	63
2.7.1.	Modelado del incendio.....	64
2.7.2.	Modelado de la evacuación.....	66
3.	Análisis de protección contra incendios basado en el desempeño	68
3.1.	Normativa competente al análisis por desempeño.	68
3.2.	Programas computacionales.....	70
3.3.	Modelado tridimensional	71
3.4.	Análisis del riesgo	72
3.5.	Selección de escenario crítico para la simulación.....	76
3.5.1.	Criterios de desempeño.....	77
3.5.2.	Selección de escenarios	79

3.5.3.	Escenario final de simulación	82
3.5.4.	Información poblacional y de carga combustible en el edificio.	83
3.6.	Desarrollo del modelo de comportamiento del fuego y humo	84
3.6.1.	Parametrización del modelado	84
3.6.2.	Modelado de la estructura	85
3.6.3.	Creación del incendio de diseño	89
3.6.4.	Ajustes de modelado	91
3.6.5.	Corrida de simulación	92
3.7.	Desarrollo del modelo de evacuación para el edificio.	93
3.7.1.	Definición de la ocupación	94
3.7.2.	Escenarios de comportamiento y pre-tiempos de evacuación	96
3.7.3.	Velocidades de desplazamiento	98
3.7.4.	Parametrización del modelado	100
3.7.5.	Corrida del modelado de evacuación	100
4.	Resultados y discusión	103
4.1.	Resultados ASET	103
4.1.1.	Visibilidad	103
4.2.	Resultados de los dispositivos	110
4.3.	Resultados RSET	111
4.4.	Comparación RSET y ASET	117
4.5.	Análisis de resultados	117
5.	Conclusiones	123
6.	Bibliografía	125

Índice de Anexos

Anexo A.	Análisis del riesgo en edificio administrativo.....	130
Anexo B.	Cálculo de ocupación.....	142
Anexo C.	Estadísticas poblacionales.....	161
Anexo D.	Extracto normativo	162
Anexo E.	Informe de diseño de ingeniería.....	165

Índice de Figuras

Figura 1. Tetraedro del fuego. (SFPE, 2016).....	26
Figura 2. Fases de un fuego típico en un compartimiento cerrado (Ingason, Li, Lonnermark, 2015)	27
Figura 3. Zonas de Flashover y Backdraft en una curva de incendio de pruebas.....	29
Figura 4. Curvas según tipo de crecimiento de un incendio. (NFPA, 2018)	30
Figura 5. Descripción esquemática del ASET y RSET con Margen de Seguridad. (SFPE, 2018).....	35
Figura 6. Línea de tiempo de respuesta humana ante un incendio (SFPE, 2018)	37
Figura 7. Proceso de evacuación (GIDAI, 2017).....	39
Figura 8. Comportamiento de la velocidad según los tipos de humo (SFPE, 2016) ..	45
Figura 9. Proceso de conformidad del diseño basado en desempeño según NFPA 101 (NFPA, 2018).....	49
Figura 10. Proceso de diseño basado en desempeño según SFPE (SFPE, 2007)	50
Figura 11. Curva idealizada del comportamiento de un incendio. (SFPE, 2016).....	57
Figura 12. Análisis de capas caliente y capa fría. (SFPE, 2016)	65
Figura 13. Fuentes de ignición de incendios según BCBCR (BCBCR, 2018)	83
Figura 14. Vista de planta de edificio administrativo, primer nivel, zona de conato (Los Autores, 2018)	86
Figura 15. Vista de planta de edificio administrativo, primer nivel, zona de conato y área de modelado (Los Autores, 2018).....	87
Figura 16. Modelado en PyroSim® de la vista de planta del conato y pasillos del primer nivel (Los Autores, 2018)	88
Figura 17. Modelado en PyroSim® de vista tridimensional de todos los niveles (Los Autores, 2018)	88
Figura 18. Estación de trabajo fuente de energía para el análisis (Los Autores, 2018)	89
Figura 19. Ensayos en estaciones de trabajo, pruebas 101 y 102 (NBS, 1988).....	91

Figura 20. Ajuste de HRR para segunda simulación (Los Autores, 2018).....	93
Figura 21. Modelo de evacuación definitivo para simulaciones en Pathfinder® (Los Autores, 2018)	101
Figura 22. Distribución de ocupantes y puertas en el área de conato. (Los Autores, 2018)	102
Figura 23. Comportamiento de la visibilidad en las puertas del conato (Los Autores, 2018).....	103
Figura 24. Vista de frente zona de conato corte en función de visibilidad 13 m. (Los Autores, 2018)	105
Figura 25. Vista de frente zona de conato corte en función de visibilidad 4 m. (Los Autores, 2018)	105
Figura 26. Sensores visibilidad rutas de evacuación (Los Autores, 2018)	106
Figura 27. Comportamiento de la visibilidad sensores ubicados en pasillos en función de visibilidad 13 m (Los Autores, 2018)	107
Figura 28. Sensores de visibilidad pasillo auxiliar niveles superiores 13 m (Los Autores, 2018)	108
Figura 29. Sensores de visibilidad niveles superiores 13 m (Los Autores, 2018)....	109
Figura 30. Resultado de sensores de temperatura en diferentes áreas (Los Autores, 2018)	110
Figura 31. Efectos del rociador sobre la curva de incendio simulada (los autores, 2019)	111
Figura 32. Proceso de evacuación del escenario de conato, simulación 4 (Los Autores, 2018)	114
Figura 33. Proceso de evacuación general del edificio, simulación 4 (Los Autores, 2018)	115
Figura 34. Condiciones de visibilidad en área de conato, simulación 4. (Los Autores, 2018)	119
Figura 35. Condiciones de visibilidad al momento que sale el primer ocupante, primer nivel (Los Autores, 2019).	120

Figura 36. Condiciones de visibilidad al momento que sale el ultimo ocupante, primer nivel (Los Autores, 2019).	121
Figura 37. Condiciones de visibilidad al momento que sale el ultimo ocupante, sexto nivel (Los Autores, 2019).	122

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Distancias de visibilidad para poblaciones británicas y estadounidenses cuando la gente se mueve a través del humo (SFPE, 2016)	44
Cuadro 2. Referencias utilizadas en el análisis. (Los Autores, 2018)	69
Cuadro 3. Resumen de metas. (Los Autores, 2018).	72
Cuadro 4. Resumen criterios de desempeño. (Los Autores, 2018).....	74
Cuadro 5. Densidad de capa de humo y visibilidad permitidos para los ocupantes (SFPE, 2016).....	78
Cuadro 6. Condiciones límite de exposición al calor (SFPE, 2016).....	78
Cuadro 7. Resumen de escenarios, primer nivel, edificio administrativo (Los Autores, 2018)	80
Cuadro 8. Escenarios críticos seleccionados (Los Autores, 2018)	82
Cuadro 9. Valores de entrada para el cálculo de la rejilla (Los Autores, 2018)	85
Cuadro 10. Dispositivos seleccionados para la simulación (Los Autores, 2018).....	92
Cuadro 11. Cantidad de ocupantes por nivel (Los Autores, 2018).....	94
Cuadro 12. Distribución de personal administrativo según predominio de género (Los Autores, 2018)	95
Cuadro 13. Distribución de profesorado según predominio de género (Los Autores, 2018)	95
Cuadro 14. Distribución de la matrícula por carreras en la UCR según predominio de género. (Los Autores, 2018)	96
Cuadro 15. Escenarios de comportamiento y tipos de ocupación. (Los Autores, 2018)	97
Cuadro 16. Escenarios de comportamiento según ISO 16738:2009 (Los Autores, 2018)	98
Cuadro 17. Tiempos de pre-evacuación en segundos según ISO 16738:2009 (Los Autores, 2018)	98
Cuadro 18. Resumen de velocidades según sexo y edad (Los Autores, 2018).....	99

Cuadro 19. Máximas velocidades de desplazamiento y velocidades de flujo sin obstáculos para desplazamientos horizontales y de escaleras (ISO, 2009)	100
Cuadro 20. Resultados ASET puerta principal y secundaria (Los Autores, 2018) ..	104
Cuadro 21. Resumen de condiciones de sostenibilidad para puerta principal de conato (Los Autores, 2018)	110
Cuadro 22. Flujo de personas en el conato (Los Autores, 2018).....	112
Cuadro 23. Resumen de tiempos de egreso seguros requeridos RSET (Los Autores, 2018)	113
Cuadro 24. Tiempos de finalización por nivel en segundos. (Los Autores, 2018)...	116
Cuadro 25. Comparativo de RSET y ASET (Los Autores, 2018).....	117

Siglas

ASET: Available Safe Egress Time (Tiempo de Egreso Seguro Disponible)

BCBCR: Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica

CFD: Computer Fluid Dynamic (Dinámica de Fluidos Computacional)

FDS: Fire Dynamics Simulator (Simulador de Dinámica del Fuego)

HRR: Heat Rate Release (Tasa de liberación o sesión de calor)

IMO: International Maritime Organization (Organización Marítima Internacional)

ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)

NBS: National Bureau of Standars (Departamento Nacional de Estándares)

NCFS: National Center For Foerensic Science (Centro Nacional de Ciencia Forense)

NFPA: National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección Contra Incendios)

NIST: National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología)

OSHA: Occupational Safety and Health Administration (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional)

RSET: Required Safe Egress Time (Tiempo de Egreso Seguro Requerido)

SFPE: Society of Fire Protection Engineers (Sociedad de Ingenieros de Protección Contra Incendios)

UCR: Universidad de Costa Rica

Resumen

El propósito de este trabajo fue analizar las condiciones de seguridad humana del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica utilizando criterios basados en el desempeño, para determinar el nivel de seguridad del edificio en sus condiciones actuales en caso de incendio. Por lo tanto, sirva como una referencia documentada para futuros trabajos basados en el método de desempeño para la carrera de Ingeniería Mecánica con énfasis en protección contra incendios.

Para alcanzar lo descrito anteriormente, se requirió analizar 3 factores para la selección de un escenario, los cuales son: la carga de fuego, las características del edificio y las características de los ocupantes. A partir de dicho análisis se estableció uno con altas probabilidades de ocurrencia y que afecte los medios de egreso.

Mediante el uso de programas informáticos pertinentes, se parametrizó y se desarrolló el modelo de comportamiento del fuego, humo y rutas de evacuación específicos para el edificio.

Una vez obtenido los resultados del comportamiento del humo y de la evacuación de los ocupantes, se procedió a comparar el tiempo de egreso seguro requerido (RSET), contra el tiempo donde las condiciones de sostenibilidad se pierden, tiempo de egreso seguro disponible (ASET).

De los factores que afectan el tiempo de evacuación, el principal fue la pérdida de la visibilidad de los ocupantes, seguido del daño térmico en las vías respiratorias de las personas y por último el factor de toxicidad en caso de aspirar los gases resultantes de la combustión.

Se debe considerar que el análisis por desempeño es un método que requiere de un análisis muy exhaustivo debido a que se adecua a las condiciones y necesidades específicas de cada edificación, de las características de cada ocupante y de los combustibles presentes; por lo tanto, no es un método generalizable.

1. Introducción

1.1. Descripción General

El desarrollo de un análisis de ingeniería basado en desempeño difiere de los realizados mediante normativas y códigos, principalmente porque el resultado obtenido corresponde a un diseño a la medida de las necesidades de un edificio (en el caso de la construcción); mientras que los diseños prescriptivos tienden a ser sobredimensionados y con un riesgo asociado difícil de conocer.

Por lo anterior, se buscó mediante el desarrollo de un análisis por desempeño, demostrar los beneficios de este, al evaluar el edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (UCR), Ciudad de la Investigación. Esto se realizó mediante visitas programadas al sitio, interpretación de planos, modelado tridimensional, para generar una simulación en materia de incendios; se analizaron los resultados y se determinaron posibles mejoras en términos de rutas de evacuación de personal y rendimiento de la edificación durante un incendio.

En general se trabajó utilizando el programa computacional Simulador de dinámica del fuego (FDS) del Instituto nacional de estándares y tecnología (NIST), en combinación de las interfaces gráficas Pathfinder® para análisis las condiciones de los ocupantes y PyroSim® para análisis de las condiciones ambientales.

Los resultados obtenidos de ellos son valores tales como tiempo de evacuación del edificio (RSET) y el tiempo en el cual se pierden las condiciones de sostenibilidad dentro de una estructura (ASET), suficientes para determinar si el edificio es apto para ofrecer el grado de desempeño seleccionado.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar las condiciones de seguridad humana del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica utilizando criterios basados en el desempeño, para determinar el nivel de seguridad del edificio en sus condiciones actuales en caso de incendio.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Definir las características del edificio, las características de los ocupantes y las características del incendio para delimitar el alcance del análisis por desempeño de la edificación.
2. Establecer los posibles escenarios de diseño mediante análisis del riesgo para seleccionar uno con altas probabilidades de ocurrencia y que afecte los medios de egreso.
3. Evaluar el tiempo ASET, para el escenario seleccionado en términos de seguridad humana ante un incendio mediante simulación de dinámica del fuego
4. Evaluar el tiempo RSET, para el escenario seleccionado en términos de seguridad humana ante un incendio mediante simulación de evacuación.
5. Realizar una comparación entre el RSET y ASET.
6. Ofrecer a la carrera de Ingeniería Mecánica con énfasis en protección contra incendios, una referencia documentada basada en un método alternativo de análisis y diseño.

1.3. Justificación

Los profesionales dedicados a la Ingeniería en Protección Contra Incendios en Costa Rica realizan diseños de seguridad humana de acuerdo al *Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos*, sin embargo, no se cuenta con registros que validen una posible utilización de otros métodos de diseño.

La incursión constante de nuevas tecnologías y automatización de edificios genera que la normativa actual se quede sin criterio para protección de la vida o bienes para ciertos riesgos, escenarios o condiciones. Por esta razón la misma normativa en varios casos suele indicar la necesidad de desarrollar soluciones de ingeniería, lo que correspondería a un diseño basado en el desempeño.

Es por esto que incursionar en diseños a la medida o por desempeño puede ser el punto de partida para dotar de un mayor entendimiento de las normas usadas actualmente como guía en la construcción en Costa Rica en materia de seguridad humana. Un buen inicio para dar notoriedad a estos estudios de ingeniería fue con el apoyo de la Universidad de Costa Rica y en si realizándolo dentro la institución, en unos de sus edificios, como lo es el de la Facultad de Ingeniería, construido para entrar en funcionamiento en el 2018.

Actualmente el edificio cuenta con planos detallados, por lo que se pudo realizar una comparación del diseño actual realizado mediante el método prescriptivo y el análisis basado en desempeño propuesto.

1.4. Antecedentes

Actualmente todas las edificaciones nuevas o que se les deba practicar una remodelación o ampliación en el país deben cumplir con los requisitos mínimos de seguridad humana y protección contra incendios que el código indique. Este requisito lo dicta la normativa de la Asociación Nacional de Protección Contra Incendios (NFPA por sus siglas en inglés), la cual desde el año 2008 es considerada de acatamiento obligatorio, mediante el Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos. A su vez, el Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica es el encargado de hacer cumplir todo requerimiento de protección contra incendios mediante previa revisión de planos durante el proceso de aceptación del proyecto constructivo.

La simple obligatoriedad de estos sistemas representa un cambio en la cultura costarricense en cuanto a prevención de riesgos se refiere. Sin embargo, el adicionamiento de estos sistemas ha llevado a un aumento de costos de los proyectos, lo que conduce a los desarrolladores a buscar métodos alternos de protección.

La División de Análisis e Investigaciones del Fuego de la NFPA (2011) ha encontrado, mediante las estadísticas, que en el caso de que se presente un incendio, la mayor cantidad de personas que se ven afectadas o mueren durante el incidente se debe principalmente por la inhalación de humos tóxicos y no por el contacto directo con las llamas. Debido a esto es importante conocer el desempeño de los edificios en temas de evacuación de personas así como de la generación y comportamiento del humo dentro de estos.

Es por esta razón que se necesita enfocar el estudio de los incendios en la preservación de las vidas humanas, y para lograr este fin es necesario comprender en que consiste un sistema de detección y alarmas confiable, y además unido a esto también se deberá conocer y contemplar un protocolo de evacuación acorde a las condiciones del edificio que se esté protegiendo. También dependiendo del tipo de

estructura y el fin para la cual fue diseñada, se debe considerar la posible instalación de un sistema de supresión de fuegos, según aplique.

El edificio de la Facultad de Ingeniería de la UCR es un sitio de reunión pública definido así por el artículo 3.3.178.6 de la norma NFPA 101. Lo anterior hace llamativo un estudio de ingeniería por desempeño, para tener conocimiento del comportamiento del edificio ante el fuego y así justificar la necesidad de implementar un plan de las rutas de evacuación de ocupantes existentes o bien un sistema de supresión contra incendios.

1.5. Metodología

El trabajo propuesto, el desarrollo del objetivo general y los objetivos específicos se desarrollarán usando la siguiente metodología:

1. Se investigó sobre distintos tipos de programas informáticos existentes en el mercado que permitieron simular la dinámica del fuego (“FDS”, siglas en inglés de “Fire Dynamics Software”) y simular el comportamiento humano en caso de una emergencia en términos de evacuación.
2. Se realizó la revisión de planos y modelado tridimensional de la edificación elegida.
3. Se analizaron los 3 factores para la selección de un escenario, los cuales son: la carga de fuego, las características del edificio y las características de los ocupantes. A partir de dicho análisis se estableció uno con altas probabilidades de ocurrencia y que afecte los medios de egreso.
4. Mediante el uso de programas informáticos pertinentes, se parametrizó y se desarrolló el modelo de comportamiento del fuego, humo y rutas de evacuación específicos para el edificio.
5. Se analizaron resultados tales como el RSET y el ASET.
6. Se redactó un informe técnico que detalla los por menores del análisis, los resultados y conclusiones.

1.6. Alcance y limitaciones

La finalidad de este trabajo fue realizar un análisis por desempeño del comportamiento de un edificio en términos de seguridad humana en caso de un incendio, el cual sirva como una referencia para los profesionales de protección contra incendios en Costa Rica, y la aplicación de este método.

Conscientes del hecho de que cada edificio es único, y de la misma manera su análisis, se necesitó realizar varias suposiciones con el fin de limitar a uno solo la cantidad de escenarios solicitados por la NFPA 101, y así generar los resultados con que se evaluaron los tiempos ASET y RSET.

Se tomaron en cuenta factores como, las características del edificio, las de los ocupantes y las del combustible. Además, se consideraron otras que podrían afectar el desempeño, tales como regulaciones aplicables, localización de la propiedad, instalaciones auxiliares, preservación histórica, consideraciones medioambientales operación y mantenimiento.

Se realizó un informe técnico el cual contiene todas las suposiciones realizadas, la normativa empleada, la metodología, resultados y su análisis y las respectivas conclusiones. Dicho informe validó el resultado obtenido.

Este trabajo no incluyó el re-diseño de los planos ni la construcción e implementación en físico de algún cambio sugerido de manera arquitectónica, eléctrica o mecánica. Además, se brindó una memoria que contiene las simulaciones que dan soporte a los análisis realizados.

Las herramientas computacionales utilizadas para las simulaciones fueron Pathfinder® y PyroSim®, ambos desarrollados por la compañía Thunderhead Engineering.

Las licencias necesarias para trabajar con los programas informáticos fueron costeadas por los integrantes del equipo de trabajo para su uso personal.

De igual manera se limitó a aplicar el método de diseño por desempeño descrito por la NFPA 101, el cual es el Código de Seguridad Humana que se encuentra vigente en el país.

Cabe destacar que para el estudio realizado se tomaron las siguientes consideraciones:

- El análisis se llevó a cabo en los edificios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica en la Ciudad de la Investigación.
- Los planos que se utilizaron para el estudio fueron suministrados por la Universidad de Costa Rica, los cuales se asumieron como planos finales de construcción.
- Debido a que el análisis es enfocado en seguridad humana, no se toma en cuenta la resistencia estructural del edificio. Se asumió que el mismo fue diseñado de manera que puede resistir el escenario de fuego seleccionado.
- Debido al tipo de ocupación, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA por sus siglas en inglés) no solicita que se cuente con una brigada contra incendios, por lo tanto no se considera la existencia de alguna en el lugar.
- Dado que es un edificio nuevo, el sistema eléctrico no se analizó y se asumió que cumple con los requerimientos mínimos de la normativa vigente. Sin embargo, no se exime de algún mal uso de las instalaciones y sobrecarga de los tomas de corriente que provoque algún incendio.
- Se tomó en cuenta la cantidad de personas y su distribución en cuanto a edades y sexo.
- El área, la geometría y la altura de los pisos fue basada en mediciones realizadas en campo y en los planos suministrados por la UCR.
- La posición, el tamaño y la cantidad de aberturas (puertas y ventanas) fueron considerados según los planos suministrados por la UCR.
- El edificio está dividido en dos torres de seis niveles, interconectadas por un puente sobre la entrada principal de la estructura, sin embargo, para el análisis solo fue considerada una torre, la de administración.

- La carga de fuego se estableció mediante un análisis del riesgo, fundamentado con visitas de campo al edificio. Además, se utilizaron bases de datos como las estadísticas de incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica (BCBCR).
- Se constató con el uso de planos y visitas que el edificio administrativo cuenta con 4 salidas de emergencia por cada piso, que están claramente señalizadas y que descargan a los puntos de reunión del primer nivel, ubicados en los costados este, noroeste y sureste.
- Se constató con el uso de planos y visitas que los edificios cuentan con sistema de detección y alarma, basado en detectores de humo fotoeléctricos y estaciones manuales. También cuentan con sistema de notificación mediante luces estroboscópicas y sirenas. El sistema de supresión es basado en estaciones manuales semiautomáticas Clase II, complementado con extintores para fuegos clase ABC. Todos los equipos mencionados están diseñados, operando y mantenidos según la normativa NFPA que le concierne.
- No fue tomado en cuenta el nivel sonoro ya que se supone que el sistema de detección y alarma fue diseñado según la normativa vigente NFPA 72.
- El edificio se usa en horario de lunes a viernes (7:00 – 22:00) y sábados (7:00 12:00) para impartir lecciones, mientras que las oficinas administrativas atienden en un horario de oficina lunes a viernes (8:00 – 17:00). Para el análisis se seleccionó una hora de alta demanda en un día de ocupación normal, Lunes a viernes (8:00 - 16:00).
- Los factores ambientales fueron supuestos con ayuda del sitio web *es.weatherspark.com* para la zona donde se encuentra el edificio.
- Velocidad del viento: 4,2 km/h
- Dirección del viento: sureste
- Temperatura ambiente y humedad: 21° C @ 30 %.
- No se tomaron en cuenta propiedades de los materiales de construcción de los elementos no estructurales como paredes, divisiones, ventanas, puertas, suelos y cielos.

- No se tomaron en cuenta los componentes estructurales tales como; localización tamaño y soporte de cargas, materiales de construcción, materiales de protección de incendios y cargas estructurales de diseño.
- No fueron tomados en cuenta para el análisis los servicios operativos y procesos propios del edificio, por ejemplo, equipos de ventilación mecánica.
- No se consideró el tiempo de respuesta de cuerpo de bomberos, debido al tipo de análisis.
- Para el estudio se requirió usar una gran cantidad de documentos, referencias y otros datos puntuales, los cuales debido a la reciente formalización de la práctica de la ingeniería contra incendios en el país se desconocen, por lo tanto, se asumen como fuentes confiables.
- Los resultados no deben utilizarse sin el permiso de los autores.

2. Marco teórico

La protección contra incendios es una disciplina que se puede afirmar se basa en cuatro metas fundamentales: proteger la vida, preservar el medio ambiente, resguardar la estructura y salvaguardar la continuidad de las operaciones.

Para poder cumplir estas metas, es necesario poder entender conceptos claves que describen el comportamiento tanto del fuego como el de los seres humanos dentro de una emergencia. La protección contra incendios incluye ramas de la ciencia tales como: termoquímica, mecánica de fluidos, dinámica del fuego, dinámica de humos, comportamiento humano, evacuación, compartimentación, comportamiento estructural y modelado computacional, solo por citar algunas disciplinas.

2.1. Fundamentos de dinámica del fuego

A continuación, se presentarán conceptos fundamentales de protección contra incendio necesarios para un entendimiento del análisis presentado en este proyecto.

2.1.1. Definición del fuego

Para definir qué es el fuego, primero se debe resaltar la diferencia entre flama y fuego. Para el primero, concretaremos que "es el resultado de una reacción química que libera energía en forma de calor, con una temperatura de entre 1500 K (1226,85 °C) y 2500 K (2226,85 °C) cuando la reacción se da en el aire" (Quintiere, 1998), a diferencia de las definiciones clásicas donde se afirmaba que el fuego es una reacción química que libera calor y luz, no obstante, en algunos casos estos productos no se presentan. Por ejemplo, en la flama de hidrógeno se genera calor no obstante su luz es imperceptible para el ojo humano. Una flama también podría ser el resultado de un proceso adiabático, por lo que el calor no sería liberado del todo. Como resultado de esto, el fuego "es la combinación turbulenta de muchas flamas" (Quintiere, 1998). Esta combinación es conocida como Flama Laminar y se caracteriza por contar con un espesor del orden de 10^{-3} cm y una tasa de liberación de energía de al menos 10^8 W/cm³. Sin embargo, esta definición es un poco difícil de medir ya que la mayoría de personas no están relacionadas con las dimensiones fundamentales usadas en su

definición. Por lo tanto, usaremos la definición propuesta por Quintiere tratando de reacomodar las ideas propuestas. Entonces, el fuego es la reacción química exotérmica que combina oxígeno con alguna sustancia (combustible) con una tasa de liberación de calor dependiente de la temperatura y los efectos catalíticos.

2.1.2. Clases de fuego

Dependiendo de cuál sea el tipo de combustible así estará definida la clase de fuego que se desarrolle. Según el BCBCR (2013) en su Manual de Disposiciones Técnicas Generales Sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios, los tipos de fuego son los siguientes:

- Clase A: se refiere a fuegos en materiales combustibles comunes como madera, tela, papel, caucho y plásticos. Esta clase de fuegos son principalmente (no siempre) en combustibles sólidos.
- Clase B: estos fuegos son característicos por abarcar combustibles del tipo líquido y gases, entre ellos aceites, grasas, alquitranes, bases de pinturas, lacas entre otros.
- Clase C: este tipo de fuego es el que vincula como combustible equipo que funcione por medio de electricidad.
- Clase D: son fuegos en metales que al estar en partículas (sodio metálico), tienen la capacidad de entrar en combustión. Como ejemplo de esto se encuentran Magnesio, titanio, zirconio, litio, potasio entre otros.
- Clase K: para este último caso el fuego está presente en utensilios o áreas de cocina que involucren como medio combustible aceites o grasas, animales o vegetales.

2.1.3. Etapas de un incendio

El fenómeno del fuego ha sido estudiado de tal manera que se le ha asignado un tetraedro para entender de mejor forma el modo en que los factores que intervienen, como el combustible, la energía de activación y el comburente, se relacionan mediante la reacción en cadena. Cabe resaltar que a partir del mismo se han logrado

conceptualizar las maneras más efectivas de controlar sus efectos. La supresión mediante agentes y la compartimentación de edificios son ejemplos sencillos pero de gran valor por la misma razón. La Figura 1 obtenida del manual de protección contra incendios de la Sociedad de Ingenieros de Protección Contra Incendios (SFPE por sus siglas en inglés) logra sintetizar la idea.

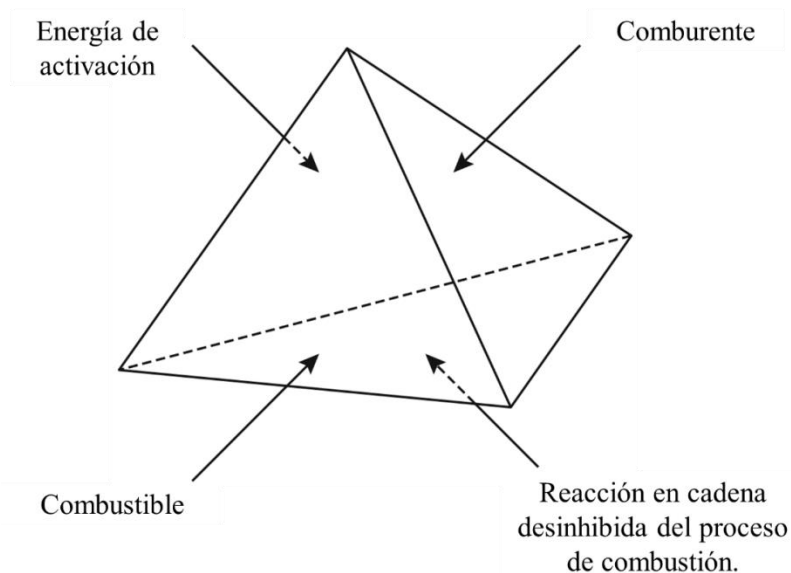


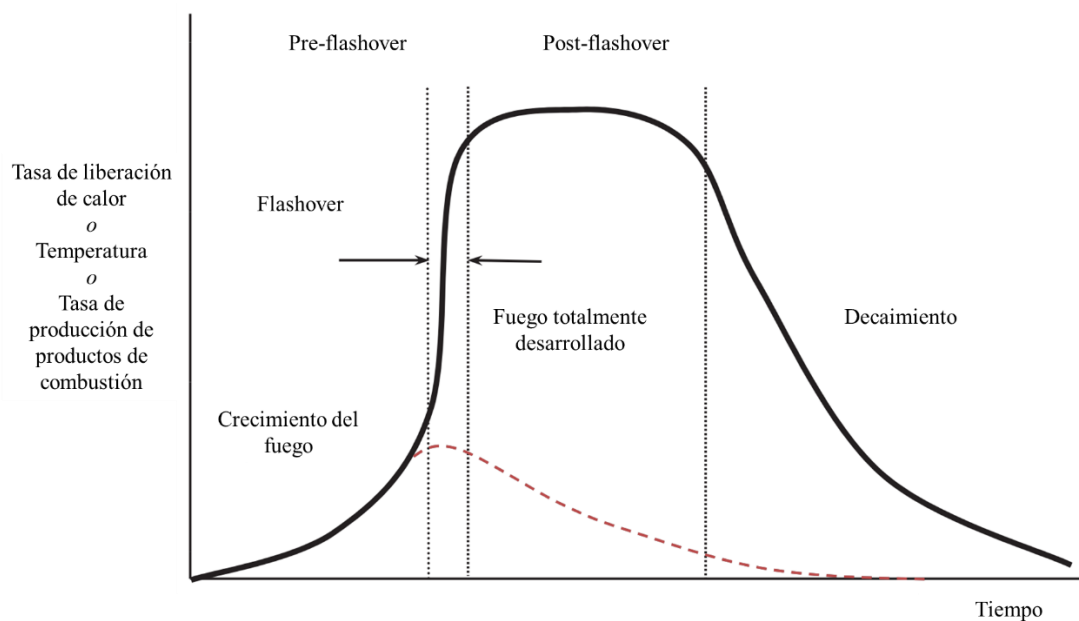
Figura 1. Tetraedro del fuego. (SFPE, 2016)

Según el enfoque utilizado, se deberá entender cómo se vincula el tiempo en el desarrollo del fuego, esta correlación es llamada etapas del fuego (NFPA, 2018) y se explican a continuación:

- Ignición: es la etapa cuando el combustible, la energía de activación y el oxígeno se combinan y reaccionan produciendo la flama.
- Crecimiento: la flama inicial se convierte en la energía de activación de la siguiente flama y así de manera sucesiva. En este momento los mecanismos de transferencia de calor (convección y radiación) inician flamas en otras superficies dependiendo de la carga combustible presente. Los gases calientes derivados de la combustión ayudan a que la pluma de fuego aumente su tamaño haciendo que por efectos físicos los gases fríos cargados de oxígeno alimenten la combustión.

- Crecimiento pleno: el fuego ha alcanzado todo el combustible por lo tanto esta es la etapa donde la generación de calor es la más alta y la combustión es más rica.
- Decaimiento (*Burnout*): en este momento la tasa de generación de calor empieza a decaer debido a que el fuego ha consumido todo el combustible disponible, por lo tanto la temperatura también empieza a descender hasta entrar en equilibrio con la temperatura del ambiente donde se desarrolló el fuego.

Lo anterior se visualiza de manera gráfica en la Figura 2. La curva mostrada corresponde a la de generación de un fuego típico en un compartimento cerrado



*Figura 2. Fases de un fuego típico en un compartimento cerrado
(Ingason, Li, Lonnermark, 2015)*

La curva roja discontinua indica el caso en que la fuente de oxígeno que alimenta el fuego se agota, lo que lleva a que se apague.

2.1.4. Fenómenos presentes en un incendio

Resulta importante definir algunos términos que serán clave para el completo entendimiento del fenómeno del fuego, como son el “*rollover*”, “*flashover*” y “*backdraft*”.

La NFPA921: Guía para Investigación de Incendios y Explosiones (2017) define el “*rollover*” como la condición donde el combustible no quemado por el fuego (material pirolizado) se acumula en la capa superior de la habitación a una concentración suficiente para que entre en ignición y arda; puede suceder sin ignición y luego de la ignición de otros combustibles separados del origen.

Los otros dos términos son fenómenos que ocurren cuando se genera un incendio en un espacio cuyas dimensiones no varían (conocido como recinto). Los términos próximos a describir son de suma importancia ya que su entendimiento genera un espacio de análisis cuando se desea prevenir y atacar un incendio en pro de salvar tanto las vidas de los ocupantes como de los mismos combatientes (la mayoría de las veces los bomberos). Sin embargo, ambos términos tienden a confundirse o son definidos erróneamente, por esa razón los siguientes párrafos explican cuál es la diferencia entre el “*flashover*” y el “*backdraft*”.

Según el cuerpo de bomberos de Nueva York (2005), el “*flashover*” se define como el repentino envolvimiento de las llamas desde el piso hasta el techo dentro del recinto, producto de la radiación que retroalimenta los gases producidos por la combustión y que todavía no se terminan de consumir. Es de suma importancia decir que en este punto todos los contenidos combustibles llegan a su temperatura de ignición y arden. Todo lo antes descrito indica que el incendio en este punto ha alcanzado su máxima temperatura posible (temperatura adiabática) y se ha convertido en un incendio completamente desarrollado. Entre los factores que contribuyen a que ocurra el “*flashover*” destacan los siguientes: la ventilación del recinto (uno de los más importantes), las dimensiones del recinto (un recinto pequeño es más propenso a sufrir un “*flashover*”), la carga combustible del recinto y finalmente la resistencia térmica que posea el recinto (mientras más resistencia más calor se acumulará dentro del mismo).

Ahora, respecto al “*backdraft*”, el mismo Cuerpo de Bomberos lo define como “la explosión del humo cuando es añadido aire al recinto”, esto ya sea porque se abrió una

puerta o se rompió una ventana, inclusive puede ocurrir cuando la carga combustible fue consumida y lo que queda dentro del recinto son solo los gases producidos por su combustión. El factor que se debe resaltar en este momento es que el “*backdraft*” se produce meramente por la alimentación de aire dentro de la mezcla combustible caliente y no por la temperatura envolvente como ocurre con el “*flashover*”. Esto indica que el “*backdraft*” puede ocurrir en cualquier momento durante la combustión ya que depende de la temperatura de ignición de las cargas combustibles. La Figura 3 ayuda a entender la diferencia entre estos dos fenómenos.

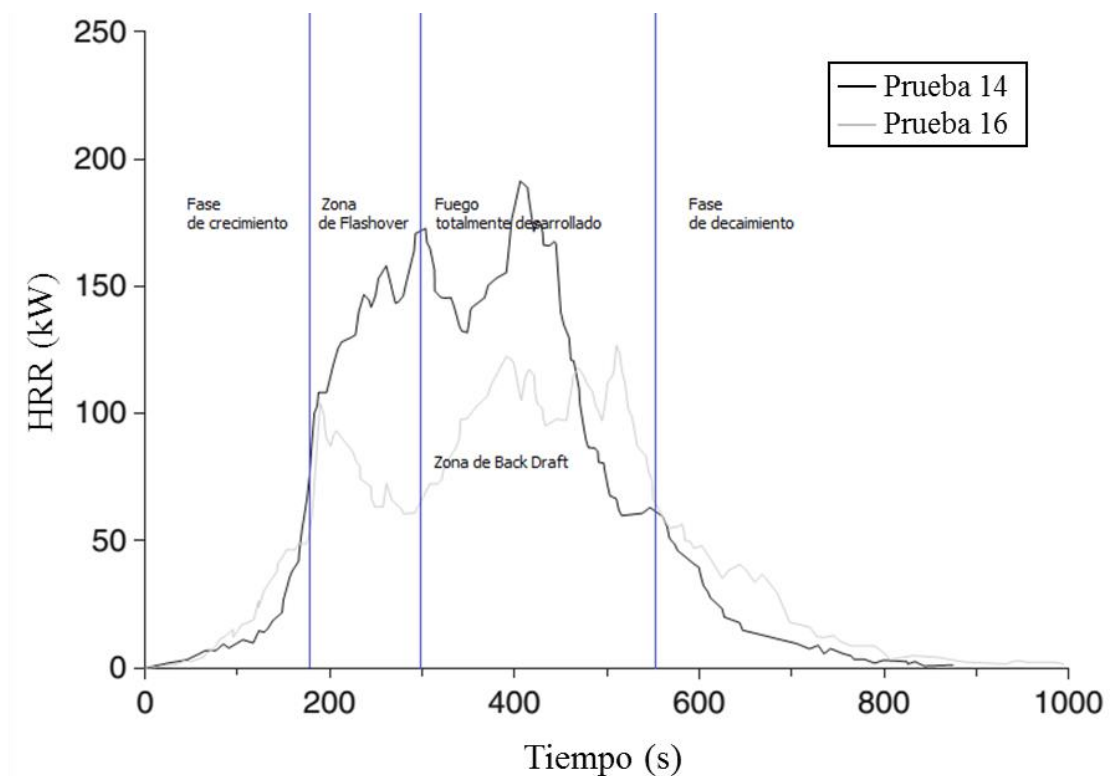


Figura 3. Zonas de Flashover y Backdraft en una curva de incendio de pruebas.

2.1.5. Generación de calor

Analizando la Figura 3, se puede observar un comportamiento de parábola desde el tiempo de ignición hasta que se alcanza la temperatura de “*flashover*”, este comportamiento se llama crecimiento del incendio y es definido por la ecuación 2.1.

$$Q = \alpha \tau^2 \quad (2.1)$$

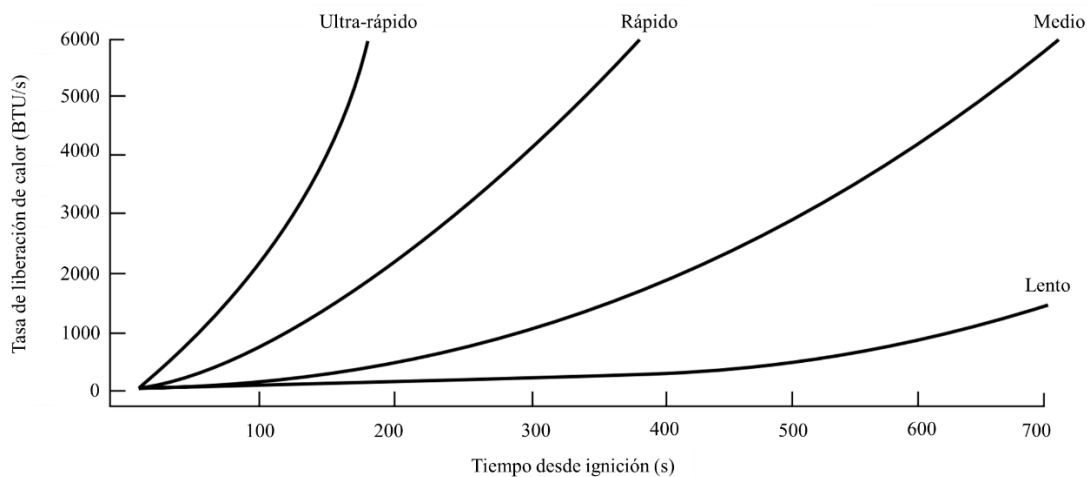
Donde

\dot{q} : Tasa de sesión de calor (kW)

α : Coeficiente de crecimiento de fuego (kW/s²)

τ : Tiempo (s)

Los resultados de muchos años de ensayos lograron determinar valores experimentales para α los cuales han sido clasificados según su velocidad de sesión de calor (HRR por sus siglas en inglés) en cuatro tipos de crecimiento: ultra-rápido, rápido, medio y lento. Esta clasificación mostrada en la NFPA 204 (2018) se aprecia gráficamente en la Figura 4.



*Figura 4. Curvas según tipo de crecimiento de un incendio.
(NFPA, 2018)*

El tiempo en el cual es liberado el calor al espacio ocupado depende principalmente del tipo de combustible presente, y es más grave cuando el tiempo para hacerlo es reducido, como el caso del incendio ultrarrápido en el que se alcanza su valor pico en 75 segundos, como por ejemplo un ambiente con polvos explosivos.

Para el tipo de análisis que se realiza, basta entender que el tiempo para que se alcancen las metas de diseño establecido va en función del tipo de incendio que se esté simulando, resultado del análisis de riesgos practicado a la estructura.

Las curvas de incendio para el análisis se encuentran disponibles de manera libre en las bases de datos de algunos motores de búsqueda, entre los que destaca el NIST y el Centro Nacional de Ciencia Forense (NCFS por su siglas en inglés), además manuales como los de la SFPE, códigos de la NFPA y variados artículos científicos entre otros documentos técnicos.

También cabe mencionar que debido a los propósitos de análisis pueden practicarse dos tipos de simulaciones con las curvas suministradas por la base de datos seleccionada. La primera se llama simulación de fuego constante (*“steadyfire”*) y la segunda simulación de fuego variable (*“unsteadyfire”*).

Para la simulación de fuego constante básicamente se simula el comportamiento de la tasa de liberación máximo y se mantiene constante a través del tiempo de simulación, por lo que no es necesario realizar mayores ajustes en la programación del modelo. La simulación de fuego variable refleja en términos más reales la simulación en base a la curva de fuego.

Todo lo anterior se requiere para poder enfocar el estudio a los medios por los cuales se generan daños a los ocupantes vinculados tanto directo como indirectamente con el incendio.

2.2. Análisis basado en desempeño para protección contra incendios

Desde el 2007, en Costa Rica, por acuerdo se adoptó la normativa NFPA como base para la posterior publicación del Manual De Disposiciones Técnicas Generales Sobre Seguridad Humana Y Protección Contra Incendios. Este manual estipula los requisitos mínimos que una edificación requiere para llevar al mínimo los daños tanto de los ocupantes como de la edificación en si.

En términos de seguridad humana la normativa aplicable es la NFPA 101, la cual en su capítulo 5 estipula los requerimientos mínimos para llevar a cabo un análisis por desempeño.

2.2.1. Introducción al análisis basado en desempeño

Primeramente, se debe definir el concepto de “Diseño basado por desempeño (prestaciones)” para poder entender las diferencias con el diseño prescriptivo, el más practicado por su facilidad de aplicación.

La SFPE (2016) define el diseño basado por prestaciones como un enfoque de ingeniería para el diseño de protección contra incendios basado en metas y objetivos de seguridad contra incendios acordados (de diseño), análisis determinístico (independiente de incertidumbres relacionadas a las entradas) y probabilístico (ligado a la incertidumbre de la variable de entrada) de escenarios de incendios y evaluación cuantitativa de alternativas de diseño contra las metas y objetivos de seguridad contra incendios utilizando herramientas de ingeniería aceptadas, metodologías y criterios de desempeño.

La definición anterior indica tres atributos principales que se derivan de ese enfoque de diseño. El primero hace referencia al nivel de seguridad, El segundo atributo define el diseño básico del edificio o estructura, abarcando conceptos como caracterización de los ocupantes, identificación de los tipos de fuego y la caracterización de sistema de protección utilizado en pro de brindar seguridad ante una emergencia de fuego. El tercer atributo abarca un análisis de ingeniería cuyo fin es determinar los elementos y estrategias que contribuirán en alcanzar el grado de seguridad propuesto.

2.2.2. Tipos de análisis por desempeño

Entre los diferentes tipos de análisis por desempeño según Nelson (1996), podemos mencionar los siguientes:

- Desempeño de los componentes: este concepto indica la particularidad de cada edificio, es decir, aísla a cada elemento del sistema, evaluando el comportamiento separado de cada sección sin tomar en cuenta el cómo podría resistir en conjunto de otros sistemas, este tipo de análisis vela por que cada componente del sistema o edificio cumpla con los estándares previstos. Como por ejemplo se puede analizar un componente estructural como una puerta y determinar que esta deba resistir o retrasar el fuego por al menos una hora mientras se expone a un incendio que llamaremos estándar para fines de comprensión. En este caso no se está tomando en cuenta que los materiales de la puerta deban ser aprobados contra incendios o situaciones similares, nada más se está verificando que la puerta cumpla con la meta fijada desde un principio la cual es retardar el fuego por al menos una hora, si lo logra el componente podría ser considerado aceptable para tal fin.
- Desempeño del ambiente: cuando se habla de ambiente en escenarios de fuego se debe limitar un poco el concepto, ya que las circunstancias ambientales hacen referencia a la identificación de las condiciones que provocarían los escenarios de fuego máximos permisibles para el diseño, como por ejemplo la temperatura, el flujo de calor y la generación de humos y productos de combustión. Como ejemplo de las condiciones ambientales se puede plantear el caso en que el humo generado en un atrio debe tener un ritmo de acumulación tal que los ocupantes puedan evacuar el área dentro un tiempo limitado sin que la presencia de gases logre opacar o retrasar esta meta.
- Desempeño de las amenazas: este enfoque trata de identificar cual es la mayor amenaza permisible para la vida humana, la propiedad, la continuidad del negocio o el ambiente natural, se podría tender a confundir entre el concepto de desempeño del ambiente ya que este analiza las máximas condiciones ambientales permisibles según las condiciones propias de la estructura. El enfoque del desempeño de las amenazas define las condiciones máximas aceptables para los valores que se deseen proteger. Un ejemplo para esto puede

ser identificar la máxima temperatura que pueda alcanzar un objeto que se intente arder.

- Desempeño de los riesgos potenciales: como todo análisis que se realice en el ámbito de la protección contra incendios este además de aspirar a evitar las pérdidas humanas, intenta reducir al máximo las pérdidas materiales reduciendo así los daños al ambiente causados por la práctica, es ahí donde se define el desempeño de los riesgos potenciales como la sumatoria de todos los riesgos por la frecuencia de que estos ocurran.

2.3. Seguridad humana

En el tema de seguridad contra incendios en Costa Rica, hablar de un reglamento normado no es algo nuevo para el sector ya que desde 1983 se incluyó una sección dentro del Reglamento de Construcciones (Berrocal, 2017), sin embargo, este no contemplaba aspectos de la protección contra incendios como por ejemplo protección pasiva (compartimentación y señalización) y activa (alarma y supresión).

Estos aspectos fueron incluidos en el reglamento establecido por el BCBCR, titulado “Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios”, en el cual se adoptan como normas de referencia las decretadas por la NFPA, sentando con esto una serie de pautas en materia contra incendios, que comprenden desde las etapas de diseño hasta las de puesta fuera de servicio de los sistemas construidos. Además, se limita la práctica de la protección contra incendios a solamente profesionales certificados en la rama dando como resultado la constante investigación y renovación en el tema.

Con el anterior precedente es que se da paso también al análisis de protección contra por desempeño amparado por el código NFPA 101. Acá se sientan las bases del análisis por desempeño, teniendo en cuenta su alcance, aplicación y requisitos tanto de diseño como de implementación y mantenimiento.

En cuanto al tema de la protección humana, la NFPA 101 (2018) en su Capítulo 5 limita el alcance a dos objetivos específicos:

- a) Mejoramiento de la capacidad de supervivencia de los ocupantes que están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego.
- b) Protección de los ocupantes que no están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego.

Ambos objetivos se alcanzan si existe un balance en dos tiempos fundamentales como lo son el “tiempo de egreso seguro requerido”, abreviado *RSET* (por sus siglas en inglés) y el “tiempo de egreso seguro disponible”, abreviado *ASET* (por sus siglas en inglés). Al fin de cuentas se busca que se satisfaga la expresión 2.2:

$$RSET < ASET \tag{2.2}$$

Esto se visualiza mejor en la Figura 2, donde muestra componentes que intervienen en la expresión (1). Dado que *ASET* debe ser mayor que *RSET*, la diferencia entre tiempos se considera el Margen de Seguridad.

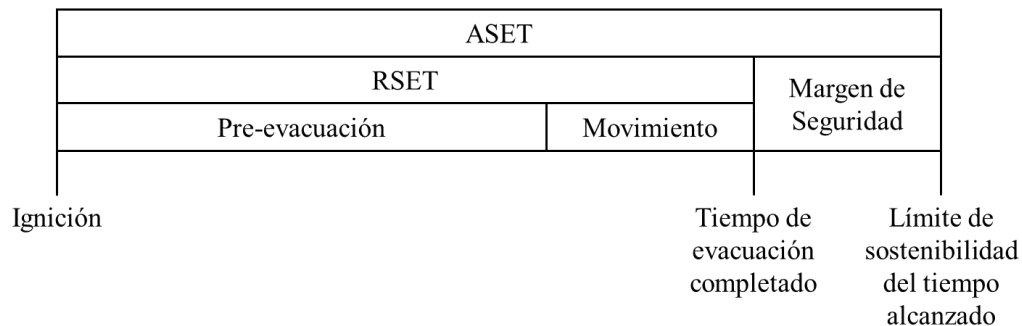


Figura 5. Descripción esquemática del ASET y RSET con Margen de Seguridad. (SFPE, 2018)

Cabe destacar que el *RSET* es dependiente de las características demográficas de los ocupantes tales como: sexo, edad, afinidad con el edificio, entre otras. El *ASET* es dependiente de las características ambientales como la carga combustible, la ventilación y arquitectura del edificio.

Ambos componentes serán profundizados en los siguientes párrafos.

2.3.1. Comportamiento humano en caso de emergencia

El comportamiento del ser humano es la base de cualquier plan de evacuación, sin embargo, es conocido que este comportamiento depende a su vez de múltiples variables, las cuales lo convierten en algo complejo de analizar. Desde principios de los años cincuenta del siglo pasado comenzó el desarrollo de teorías, pero no fue hasta finales de los sesenta que investigadores como Johnson Norris (1987), Wenger Dennis (1975) y Quarantelli E.L (1971), realizaron muchas idealizaciones para describir el proceso conductual en términos más sencillos de comprensión y con esto poder generar modelos que entreguen resultados aprovechables, para realizar diseños tanto de edificaciones como de programas de evacuación y rescate.

El comportamiento humano durante una emergencia es definido como "El estudio de la respuesta humana, esto incluye el conocimiento, creencias, actitudes, motivaciones, decisiones, comportamientos y desarrollo de estrategias cuando se ve expuesto al fuego u otras emergencias dentro de un edificio, estructuras o medios de transporte" (SFPE, 2016).

Tratar de describir el comportamiento del ser humano durante un incendio no es una tarea que involucre únicamente ecuaciones y modelos psicológicos, sin embargo, se puede predecir que en caso de emergencia el comportamiento humano tenderá a la autoprotección y posterior a esto, la protección a las personas que tengan afinidad con él. En otras palabras, puede decirse que el ser humano intentará "ponerse a salvo". Tomando este comportamiento instintivo como base, es que se ha logrado entender y desarrollar el concepto de evacuación, que será la primera estrategia en caso de emergencias.

2.3.2. Proceso de evacuación y RSET

La evacuación es un fenómeno conductual y físico que consiste en la respuesta de las personas ante una situación de riesgo real o potencial implicando su desplazamiento de una zona afectada hacia un área de refugio.

Volviendo al hecho de que la evacuación es un proceso conductual y físico se tratará de describir cómo funciona este proceso y más importante que factores son los encargados de limitar este proceso.

La siguiente ilustración representa en términos generales el comportamiento que la mayoría de las personas podría experimentar durante una emergencia contrastada con el tiempo.

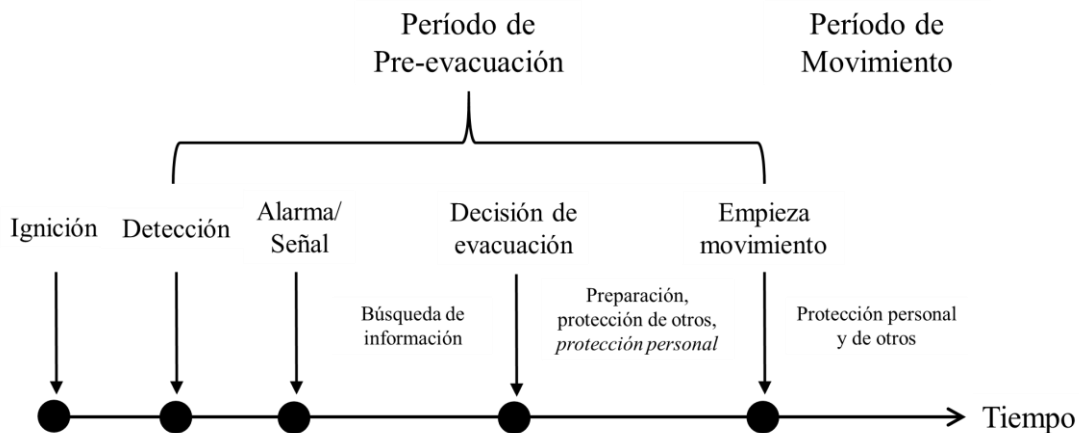


Figura 6. Línea de tiempo de respuesta humana ante un incendio (SFPE, 2018)

En la Figura 6 pueden identificarse 2 procesos: el primero es el llamado Período de Pre- evacuación el cual está en función del tiempo de detección, el tiempo de alarma y el tiempo de decisión de evacuación. El segundo proceso se define como el Período de Movimiento, el cual inicia cuando el primer ocupante decide moverse y se extiende hasta que el último ocupante finaliza su evacuación. La sumatoria de los procesos da como resultado el tiempo de seguridad de egreso requerido RSET.

El periodo de pre- evacuación es considerado como el tiempo desde que se produce la emergencia (ignición) hasta que el movimiento comienza, durante todo este proceso al menos tres fases pueden estar presentes y se describen en seguida:

- Fase de pre-alarma: es el tiempo desde que el la fuente de ignición comienza hasta que las alarmas son activadas ya sea por una persona expuesta al incidente o detectores de humo o calor.
- Fase de toma de decisión para evacuar: tiempo donde se busca la información necesaria con fines valorativos en pro de desalojar la zona y protegerse a si o a los demás.
- Fase de acciones protectoras: en este punto los ocupantes realizan ciertas acciones definidas principalmente por el juicio de cada uno, estas pueden ser tomar algunas pertenencias, asistir a otros ocupantes entre otras acciones.

El periodo de movimiento comienza desde que termina el periodo de pre-evacuación hasta que los ocupantes logran llegar al área de refugio.

El área de refugio está definida por NFPA 101 (2018) como "un área que consiste en un piso en un edificio donde los ocupantes están totalmente protegidos, mediante un sistema aprobado y supervisado de rociadores automáticos y que tiene no menos de dos habitaciones o espacios accesibles, separados entre sí por tabiques resistentes al humo o un espacio ubicado en un recorrido que conduce a una vía pública, que se encuentra protegido de los efectos del fuego, ya sea por medio de su separación respecto de otros espacios en el mismo edificio o en virtud de su ubicación permitiendo así una demora en el camino de egreso desde cualquier nivel".

En otras palabras, un área de refugio se utiliza como zona de estancia temporal durante el egreso, para que las personas puedan estar a salvo mientras se evalúan las emergencias potenciales, se toman decisiones y se inician las actividades atenuantes resultado de la situación de emergencia que propició la evacuación. Es decir, un área de refugio inclusive puede ser otro edificio, un vestíbulo o un descanso ampliado de una escalera. Cuando se habla de áreas que están protegidas en su totalidad por rociadores automáticos, estas son consideradas como espacios en su totalidad seguros, la normativa vigente en el país desde 2007 le confiere a los sistemas de rociadores automáticos correctamente diseñados y aprobados por la autoridad competente (BCBCR) un grado de confiabilidad superior a cualquier otra forma de supresión de

fuegos. Esto es simple de explicar ya que se ha demostrado que los rociadores automáticos pueden atacar un incendio desde su punto de origen, limitando así la producción de gases tóxicos que más adelante en este capítulo serán descritos, además los rociadores automáticos garantizan la continuidad de la actividad dentro de las instalaciones.

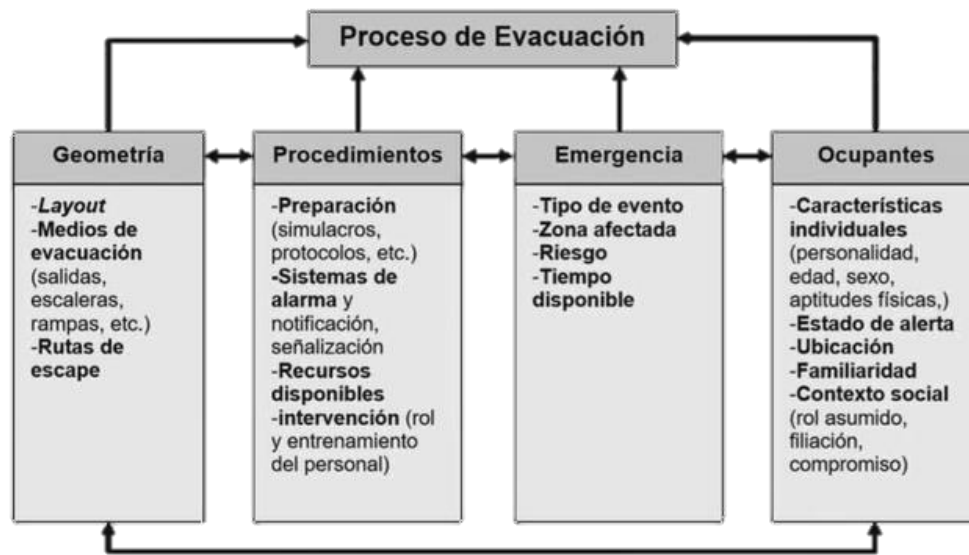


Figura 7. Proceso de evacuación (GIDAI, 2017).

La Figura 7 muestra cómo se entrelazan todos los factores del proceso de evacuación.

Empezando por la geometría, se puede suponer que esto es algo a lo que los ocupantes deberán acoplarse ya que se refiere a las características del recinto dentro del cual están presentes durante el momento de la emergencia, esta construcción contiene dentro de sí los medios de evacuación y las rutas de escape, las cuales son fundamentales si se quiere garantizar una evacuación efectiva. Es por lo tanto que se deben considerar para diseñar los medios y rutas de evacuación desde la zona afectada hasta la zona segura todos los obstáculos que la edificación contenga, entre ellos: rampas, escaleras, pasillos, salones entre otros. Mientras más obstáculos contengan el recorrido de escape el tiempo total se verá afectado.

A todo lo anterior se le suman las características físicas de los ocupantes. Además de lo antes mencionado se le debe añadir el grado de familiaridad que los ocupantes tengan tanto con la edificación como con los procedimientos o protocolos ante emergencias. También se debe contar con un sistema de detección y alarma que active el protocolo de evacuación y cabe resaltar que esto no implica que este deberá ser electrónico ya que personas cumpliendo la función de anunciadores pueden ser las detonantes del protocolo de evacuación. La SFPE (2018) brinda una explicación detallada de las características de los ocupantes, entre las cuales se pueden mencionar:

- Cantidad y densidad de los ocupantes
- Condición de estar solo o acompañado
- Familiaridad con el edificio
- Distribución y actividades
- Alerta
- Habilidad física y cognitiva
- Afiliación social
- Función y responsabilidad
- Ubicación
- Compromiso
- Punto focal
- Condición del ocupante
- Sexo
- Cultura
- Edad

Analizando a profundidad el comportamiento humano ante una evacuación se debe mencionar el espacio y el tiempo, ya que los ocupantes deben completar el desplazarse desde un espacio inseguro hasta un espacio seguro en un determinado tiempo. Lo anterior infiere que se debe contar con una cierta velocidad de desplazamiento la cual depende de cada tipo de persona.

Esta velocidad no es constante y el mayor factor que lo afecta es la densidad de personas presentes, esto si se analiza en un área determinada, por ejemplo una puerta, nos dará como resultado el flujo de personas.

El tiempo de flujo es definido como "la componente del tiempo de evacuación total que implica el tiempo durante el que un flujo de personas atraviesa un punto en el sistema de medios de egreso" (NFPA, 2018). Basado en un modelo hidráulico es como se han podido determinar los tiempos aproximados para el egreso de ciertos grupos de ocupantes, el modelo trabaja con el flujo de personas (densidad de personas) pasando por los medios de egreso (ancho efectivo del componente de egreso), el verdadero factor que afecta la ecuación es dependiente de la información disponible de los ocupantes presentes, mientras más certera sea la información las decisiones que se tomen serán crecidamente determinantes que cuando se sobreestiman los valores de entrada, esta sin embargo es la meta más ambiciosa de la investigación del comportamiento humano en el fuego. Para citar un ejemplo, en el estudio llamado "Methodologies Employed in the Collection, Retrieval and Storage of Human Factors Information Derived from First Hand Accounts of Survivors of the WTC Disaster of 11 September 2001" (2008), luego de los hechos del 11 de setiembre del 2001 en el World Trade Center se entrevistó a 245 personas sobrevivientes consultándoles sobre el proceso de decisión tomado durante la tragedia, generando con eso datos más reales que ayudan posteriormente al mejoramiento de la información que se usa en los análisis.

2.3.3. Comportamiento del ambiente y ASET

Uno de los objetivos de la ingeniería en protección contra incendios es reducir las condiciones que puedan dañar a los ocupantes (NFPA, 2018). Para lograr esto, se puede abordar desde diferentes ángulos, los cuales son listados a continuación:

- Diseñar de tal manera que los efectos del incendio no alcancen ningún lugar ocupado.

- Diseñar de tal manera que la capa de humo no descienda por debajo de la altura de la cabeza, en cualquier espacio ocupado.
- Diseñar de tal manera que cualquier área ocupada sea evacuada antes que la capa de humo descienda por debajo del nivel de la cabeza.
- Conducir un análisis de los riesgos en el ambiente de fuego inducido, con el fin de determinar cuáles de ellos provocan un ambiente que pueda incapacitar personas.

De los casos anteriores, solamente el último será analizado para la elaboración de este trabajo, debido a que un ambiente de fuego inducido puede crear daño térmico, toxicidad, reducción de la visibilidad, por lo que se vuelve importante su análisis, ya que el efecto de los tres fenómenos durante el incendio podría provocar la incapacidad de los ocupantes.

2.3.3.1. Daño térmico

Mientras un individuo sea expuesto a una tasa de radiación térmica por debajo del valor de $1,7 \text{ kW/m}^2$ (valor de radiación alrededor del 50% más intensa que la recibida por el sol), el individuo no experimenta muestras de daño por el calor, inclusive en periodos de tiempo largos. Sin embargo, cuando el individuo es sometido a un aumento progresivo de la dosis de radiación calórica, el tiempo en el que se muestran los síntomas de daño térmico se ve reducido exponencialmente, como lo detalla la Guía de Ingeniería de Diseño Basado en Desempeño de la SFPE (2007). Además, las temperaturas para que se alcancen quemaduras de piel e hipertermia (patología asociada al aumento abrupto en la temperatura corporal y que se produce entre otras causas por el aumento de la temperatura exterior de tal manera que los mecanismos corporales de refrigeración no pueden liberar suficiente energía calórica), rondan los 80° C en una atmosfera húmeda y 120° C en una atmosfera seca, sin embargo este último dato se puede desestimar debido a que los materiales constructivos considerados como combustibles de interés en el edificio pueden contener hidrógeno, lo cual favorece a los incendios inducidos con atmosferas húmedas, esto según Purser (2008).

2.3.3.2. Toxicidad

La reducción de la movilidad de los ocupantes en un incendio se estima tomando como base la Fracción de Dosis Efectiva (FED) a la que se ven expuestos los ocupantes del edificio en un incendio, esta depende tanto de los productos asfixiantes como de los productos irritantes, tales como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO₂) y el ácido clorhídrico (HCl), un simple análisis de chimenea es suficiente para estimar la fracción de cada especie sin embargo diferentes tipos de programas computacionales como lo son el FDS del NIST logra predecir los productos de los combustibles más comunes en incendios de diseño. Lo que logra aumentar la confiabilidad de los resultados entregados y también de las posibles mejoras propuestas.

2.3.3.3. Visibilidad

La reducción en la velocidad de egreso, reducción en la probabilidad que los ocupantes se muevan a través de la ruta de egreso y finalmente la reducción en la habilidad de orientación de los mismos, son factores que según Bryan (2008) contribuyen con el alcance de las metas en temas de seguridad humana. Si bien es cierto la visibilidad per se, no produce daños psicológicos en los ocupantes, es encargada de limitar acciones en los mismos.

El Cuadro 1 muestra el alcance de la vista de una muestra puntual de personas tanto británicas como estadounidenses cuando se desplazan a través del humo.

Cuadro 1. Distancias de visibilidad para poblaciones británicas y estadounidenses cuando la gente se mueve a través del humo (SFPE, 2016)

Distancia de visibilidad		Muestra de población	Muestra de población
(m)	[ft]	británica [%]	estadounidense [%]
0-0,6	0-2	12	10,2
0,9-1,8	3-6	25	17,2
2,1-3,7	7-12	27	20,2
4,0-9,1	13-30	11	31,7
9,4-11	31-36	3	2,2
11-14	37-45	3	3,7
14-18	46-60	3	7,4
>18	>60	17	7,4

Sin embargo, diferentes estudios en especial el de Jin (2008) demostró que la velocidad de las personas que se ven expuestas a humos irritantes (como el que contiene partículas de cloro) se reduce considerablemente a diferencia de los humos de tipo no irritante, la siguiente grafica muestra el comportamiento de la velocidad en presencia de cada uno de los diferentes tipos de humo.

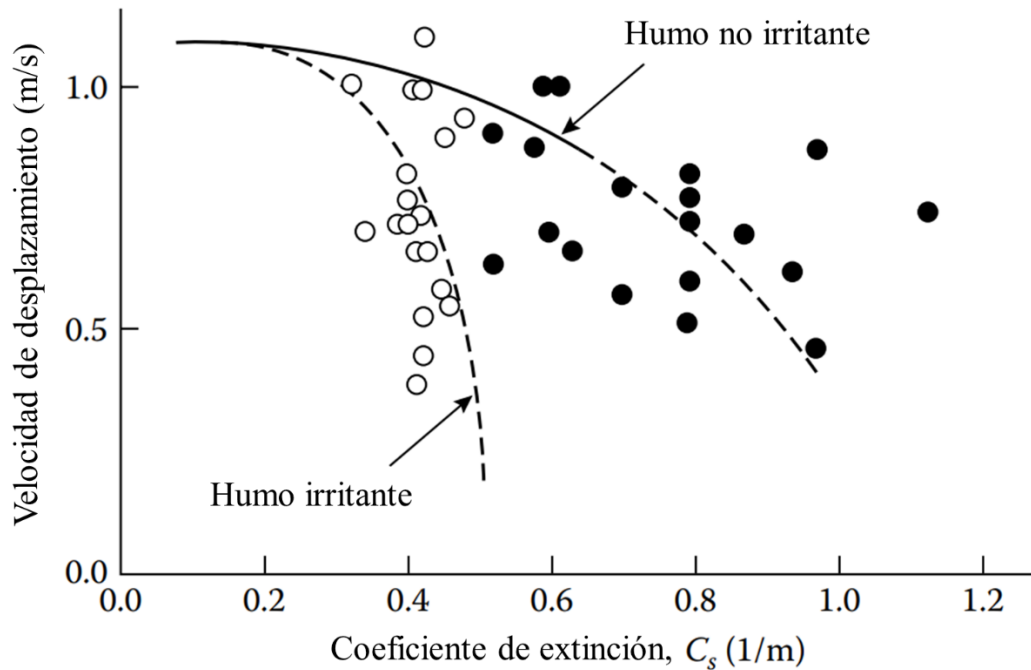


Figura 8. Comportamiento de la velocidad según los tipos de humo (SFPE, 2016)

El discernimiento entre objetos, llamado Contraste, es afectado de tal manera que se podría confundir la ruta de evacuación. Por lo tanto, Jin (2008) postula que un contraste del 2% es considerado el mínimo necesario para distinguir una señal de evacuación entre otros objetos presentes durante el recorrido de hasta el sitio seguro.

Dado lo anterior es que se sugiere separarlas señales en dos tipos: las señales de tipo emisor y las señales de tipo reflectante. Para estas señales se fija de manera respectiva valores de 8 y 3, tales que satisfagan la expresión 2.3 que corresponde a la ecuación de contraste (Mulholland, 2008).

$$\text{Contraste} = K \times S \quad (2.3)$$

Donde:

K : coeficiente de extinción de visibilidad [m^{-1}]

S : distancia visible [m]

Otros investigadores sugieren que para análisis rápidos se use un valor de visibilidad de 10m sin importar la familiaridad del ocupante con el edificio y para análisis más detallados se use 5 m para personas con afinidad en el edificio y de 20m para personas sin afinidad a él.

Por otra parte, el Manual de Protección Contra Incendios de la SFPE (2016) en su Capítulo 61 indica valores de 13,0 metros para personas sin afinidad a la edificación y de 4,0 metros para personas con afinidad a la edificación.

2.4. Análisis del riesgo

El análisis del riesgo para la ingeniería de protección contra incendios se basa en la introspección de tres preguntas: “¿qué podría pasar?, ¿qué tan malo podría ser si eso pasara? y ¿qué tan probable podría ser?” (SFPE, 2016).

La primera se refiere a la serie de eventos que conllevan a las pérdidas por incendio. Esta secuencia completa se conoce como escenario. La segunda pregunta se refiere a la consecuencia, llamada peligro, que es la medida potencial de lo que se podría perder. La tercera pregunta finalmente se refiere a la probabilidad y tiene una componente aleatoria. Sin embargo, se requiere que el análisis contenga al menos estos elementos fundamentales.

2.4.1. Criterio NFPA 101: Código de Seguridad Humana

Existen un gran número de tipos y modelos para análisis del riesgo debido a la versatilidad que ofrece en términos de desempeño, ya que el riesgo que se trata de minimizar se aborda desde diferentes tipos de metodología, logrando así una alta eficacia del análisis. Sin embargo, para fines del análisis del proyecto se estudiaron los sugeridos por la NFPA 101 (2018), Capítulo 5, el cual solicita cumplir como mínimo con 8 escenarios de fuego, los cuales son resumidos a continuación.

- Escenario de diseño 1: es un escenario que represente un incendio típico de la ocupación analizada.

- Escenario de diseño 2: es un incendio de tipo ultra rápido desarrollado cerca o en los medios principales de egreso con las puertas interiores abiertas.
- Escenario de diseño 3: un incendio que empiece en una ocupación normalmente cerrada y que puede poner un gran número de ocupantes en riesgo.
- Escenario de diseño 4: un incendio que se origine en una pared o cielo que este junto a un salón grande y ocupado.
- Escenario de diseño 5: un incendio de tipo lento no alcanzado por el sistema de protección contra incendios en cercana proximidad de un área de gran ocupación.
- Escenario de diseño 6: es el incendio más severo que se pueda obtener debido un gran número de combustibles agrupados debido a la operación normal del edificio.
- Escenario de diseño 7: es un incendio de exposición exterior que se propaga y desarrolla condiciones intolerables dentro del área.
- Escenario de diseño 8: es un incendio de combustibles ordinarios con los sistemas pasivos y activos de protección de incendios independientemente ineficaces.

2.4.2. Criterio SFPE

El Manual de Protección Contra Incendios de la SFPE (2016), brinda una serie de métodos que pueden ser revisados para la selección del escenario de diseño y estos son los siguientes:

- Análisis de efectos y modo de falla, donde los diferentes tipos de falla que podrían ocurrir son estudiados y los efectos de estas fallas son analizadas.
- Análisis de falla donde causas potenciales de falla esperadas son identificadas el rendimiento esperado del sistema es investigado.
- Análisis “¿qué pasaría si?”, donde la opinión experta es usada para considerar eventos posibles y las consecuencias de estos.

- Manuales, datos históricos y listados, donde eventos pasados en una edificación similar son estudiados para determinar aquellos que podrían ocurrir en el edificio que se está analizando.
- Datos estadísticos de incendios a través de cuadros de clasificación.
- Además de los métodos tales como estudios de peligro y operabilidad, análisis de riesgo preliminar, arboles de fallas, análisis de árbol de eventos, análisis causa consecuencia y análisis de confiabilidad.

2.4.3. Estadística del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.

El BCBCR ofrece mediante su sitio web la descarga de estadísticas sobre los incendios investigados cada año, brindando distintas clasificaciones como: uso de la estructura, área de origen, fuentes de ignición, causas. Esto es de suma ayuda para enfocar los análisis en la realidad propia del país y no basar decisiones en bases de datos de investigaciones extranjeras.

2.5. Etapas del proceso de análisis por desempeño

Según la referencia que se tenga en cuenta se puede encontrar que el diagrama de flujo definido para llevar a cabo un análisis basado en desempeño se ve modificado. En la Figura 9 se encuentra el proceso de conformidad del diseño basado en desempeño según NFPA 101 (2018). Este, a diferencia del proceso de diseño basado en desempeño según SFPE (ver Figura 10), se muestra de una manera más condensada y no indica de manera detallada documentos de soporte del diseño que se van generando durante el proceso, tales como el Resumen de diseño, Reporte de diseño basado en desempeño y la serie de entregables finales (planos, manuales de operación y mantenimiento, otros).

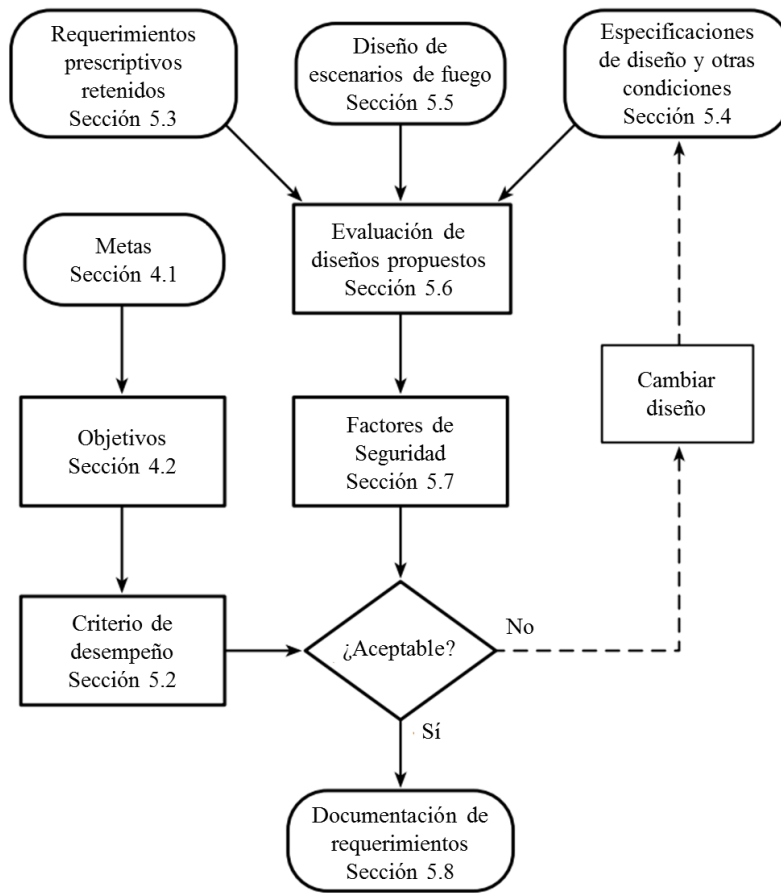


Figura 9. Proceso de conformidad del diseño basado en desempeño según NFPA 101 (NFPA, 2018)

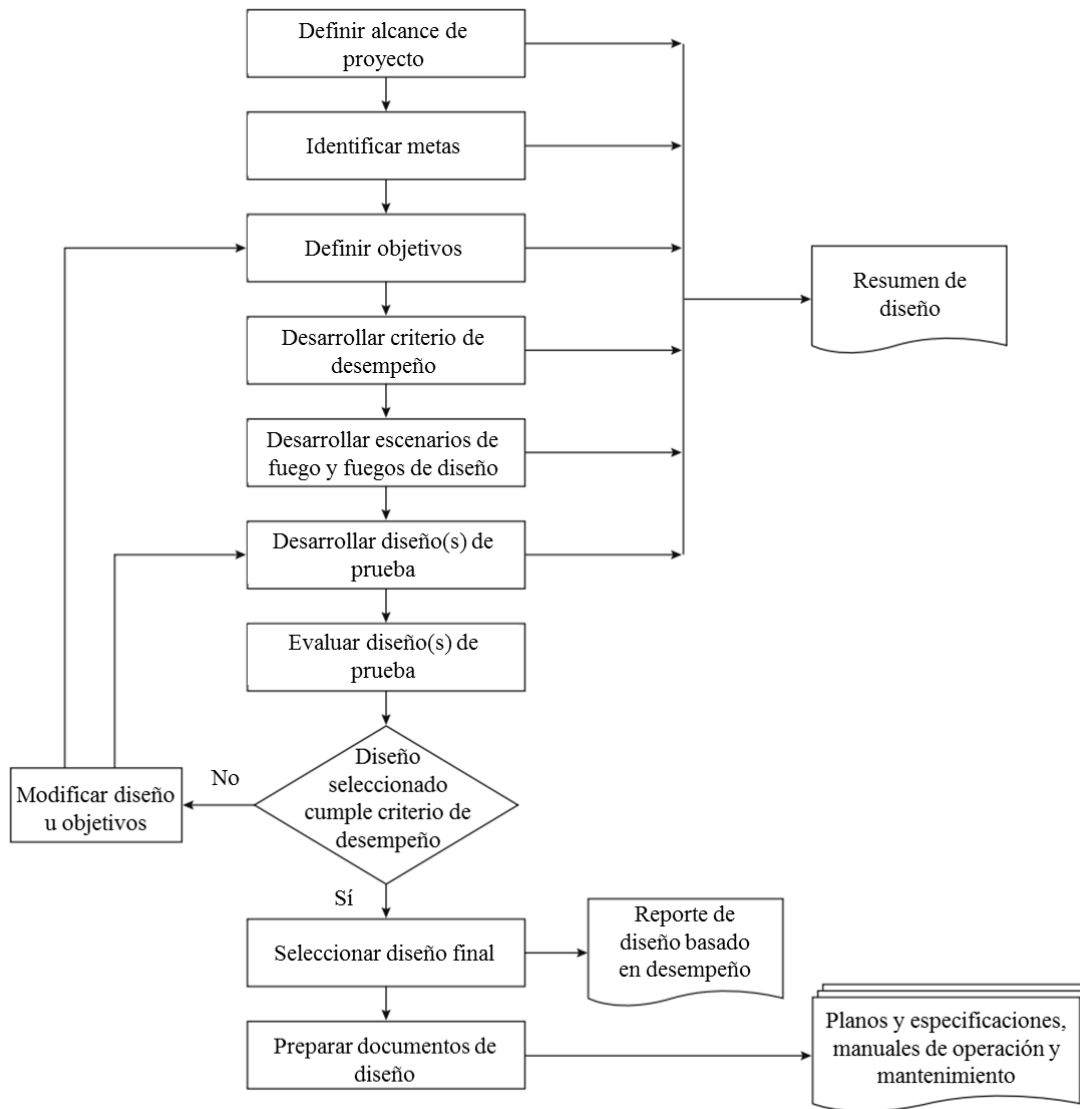


Figura 10. Proceso de diseño basado en desempeño según SFPE (SFPE, 2007)

Las fases del proceso de diseño por desempeño serán descritas a continuación, tomando en cuenta el proceso de la SFPE (2007).

2.5.1. Definición del alcance del proyecto

Es el primer paso en todo diseño ingenieril, esta etapa no difiere mucho del proceso de selección cuando se habla de diseños prescriptivos. Esta etapa identifica las porciones de edificio que se considerarían en el diseño, las características deseadas en el diseño, las características del edificio y la legislación aplicable al diseño. El proceso

también incluye un término sumamente interesante el cual es llamado “*stakeholders*” que se traduce al español como el accionista o inversionista. En esta etapa de alcance se trata de envolver al inversionista para que él se encargue de describir sus metas y estas también sean alcanzadas con el diseño.

2.5.2. Identificar metas

La SFPE (2016) define las metas como el resultado global deseado de seguridad contra incendios expresado en términos cualitativos. Cabe resaltar que estas metas pueden generalizarse en términos que sean fácilmente comprendidos por personas que tengan poco conocimiento o experiencia en ingeniería, El propósito principal de esta etapa es facilitar el entendimiento de lo que se debe alcanzar cuando se habla de protección contra incendios.

La Guía de Ingeniería para Diseño Basado en Desempeño de la SFPE (2007) define 4 tipos de metas que son enunciadas a continuación:

- Preservar la vida.
- Preservar los bienes.
- Garantizar la continuidad de las operaciones.
- Preservar el medio ambiente.

Se debe hacer un pequeño paréntesis para aclarar que las metas que se decidan en el diseño pueden ser tan diferentes y diversas como el mismo diseñador, sin embargo, algunos códigos recomiendan u ofrecen ciertos lineamientos para evitar la distorsión del principal objetivo que es preservar la vida. Entre ellos podemos mencionar estándares y códigos como por ejemplo NFPA 101 Código de Seguridad Humana (2018) que en su Capítulo 4 identifica como metas lo indicado en el siguiente extracto:

4.1.1 Incendios. Una meta de este Código es ofrecer un ambiente que sea razonablemente seguro para los ocupantes, en caso de incendio, por los siguientes medios:

*(1)*Protección de los ocupantes que no están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego*

(2) Mejoramiento de la capacidad de supervivencia de los ocupantes que están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego.

4.1.2 Emergencias similares. Una meta adicional es ofrecer seguridad a la vida durante emergencias que puedan ser mitigadas utilizando métodos similares a aquellos utilizados en caso de incendio.*

4.1.2 Movimiento de las personas. Una meta adicional es proveer un movimiento razonablemente seguro para las personas en emergencia y, donde se requiera, un movimiento razonablemente seguro en condiciones sin emergencia.*

Hasta el momento el código no ha mencionado nada en específico respecto a las tres restantes metas del SPFE, mientras que NFPA 5000: Código para la Construcción de Edificios y Seguridad (*NFPA 5000®: Building Construcción And Safety Code®*) realiza un compilado de su principal meta el cual es descrito seguidamente:

4.1.1 Metas. Las principales metas de este código son seguridad, salud, uso del edificio y bienestar público incluyendo también la protección de la propiedad.

Existen otros estándares que también proveen metas similares como lo es el ICC Código de Rendimiento para Edificios y Facilidades (*ICC Performance Code® for Buildings and Facilities*). En general la etapa de definición de metas se basa en seleccionar cuál o cuáles serán los enfoques que se le darán al diseño, como se está hablando de prevención y combate de incendios en este caso la mayor de ellas será la seguridad humana.

2.5.3. Definir objetivos

El tercer paso en este proceso es el definir objetivos. A diferencia de las metas, los objetivos caracterizan de manera mucho más técnica y con bases ingenieriles el grado de protección o desastre al que se desea llegar.

Aquí es donde se deben diferenciar dos tipos de objetivos que podrían ser similares o diferir completamente. El SFPE los identifica como los objetivos del inversionista (*“stakeholder objectives”*) y los objetivos del diseñador.

Los objetivos del inversionista se basan en definir el máximo nivel de daño que se desee recibir a diferencia de las metas definidas anteriormente. Esto se puede expresar en términos de daño a la propiedad, cese de las operaciones y daños a equipos críticos. Estos objetivos proveen un entendimiento en términos de daños tolerables en la eventual ocurrencia de un incendio dentro de las instalaciones del inversionista. Se debe hacer una observación en este punto y es que el Manual de Diseño basado por prestaciones recomienda que se definan primero los objetivos del accionista antes que los objetivos del diseñador.

Los objetivos del diseñador no son más que los ítems que se intentan proteger en caso de que un incendio se desarrolle, y ellos definen el grado de condiciones máximo y mínimo aceptable para alcanzar los objetivos del accionista.

En resumen, se puede expresar una relación entre los dos intereses de la siguiente manera: el accionista define hasta donde quiere recibir daño en caso de una eventual situación de incendio, y el diseñador establece las pautas para lograr ese nivel de riesgo aceptable.

2.5.4. Desarrollo del criterio por desempeño

Este es el cuarto paso en el desarrollo de un diseño basado por prestaciones. En específico, el criterio de desempeño habla de los valores umbrales o máximos que si se exceden, representarían una radiografía de los daños considerados como inaceptables en una eventual ocurrencia del fuego. En este punto del proceso de diseño tiene mucha más relevancia el diseñador que en los anteriores pasos, esto debido a que se deben incluir datos numéricos como lo son: temperaturas de ignición de los materiales, concentración y velocidad de propagación del humo, velocidad de transferencia de calor, visibilidad, comportamiento humano, resistencia de los materiales, niveles de toxicidad críticos y demás criterios que solo competen al diseñador, los cuales si bien es cierto pueden ser consultados con otros especialistas, Finalmente es el diseñador quién los va a manipular de acuerdo a la experiencia con la que cuente y el resultado que desee observar.

La SPFE (2007) recomienda que se dividan los criterios de desempeño en dos categorías: el criterio de seguridad humana y el criterio de no seguridad humana, con esto es suficiente para poder delimitar los valores umbral del diseño ya que el primer criterio debe incluir todas las variables que atenten contra la sobrevivencia de los ocupantes (efectos térmicos sobre los ocupantes, toxicidad de los productos del fuego y niveles de visibilidad por mencionar algunos) en caso de que un incendio se desarrolle en las instalaciones, y el segundo hace referencia a los demás intereses que el inversionista desea sean cubiertos por el diseño.

2.5.5. Desarrollo de los escenarios de fuego y los incendios de diseño

Las formas de apagar un incendio pueden ser tantas como los tipos de materiales combustibles que existen. Es por tal razón que se requiere reducir el número de escenarios, para así no extender la etapa del análisis más allá de lo necesario. Sin embargo para lograr esto se requiere de un alcance bien delimitado.

La SFPE sugiere que se realicen dos pasos para tal fin. El primero es considerar todas las posibles causas de un incendio dentro del alcance del proyecto que se tenga. Luego de completado lo anterior, el segundo paso es reducir los posibles escenarios en una fracción que sea manejable para el análisis. Se sugiere realizar una matriz de escenarios donde se pueden agrupar de varias maneras, las cuales pueden ser de acuerdo a modelos probabilísticos, donde se excluyen los menos probables dentro del alcance del proyecto. También se pueden agrupar seleccionando los escenarios límite o barrera para un análisis de daños; o también se pueden agrupar como escenarios con un factor en común, los cuales pueden ser tratados como un solo escenario cuyo riesgo se verá en aumento a razón de la cantidad de probabilidades de que ellos ocurran.

Cualquiera sea el método de selección, todos requieren de un estudio previo de las características del edificio, del tipo de fuego y no se pueden excluir las características humanas que abarcan la habilidad de los mismos de atender y responder al evento.

Algunos ejemplos de análisis aplicables a la selección de los escenarios son los siguientes: análisis de falla, análisis “¿qué pasaría si?”, datos históricos, modelos

estocásticos y análisis del riesgo, por mencionar algunos. Esto nos indica que podemos usar muchos criterios para poder delimitar nuestros escenarios de fuego antes de la siguiente etapa.

2.5.6. Desarrollo de los escenarios de prueba

El paso número seis en el proceso del diseño basado por desempeño se puede definir como todas las estrategias desarrolladas para alcanzar las metas del proyecto. Deben ser considerados todos los criterios de desempeño para su ejecución.

Según la SFPE, estos pueden dividirse en 6 tipos, los cuales son mencionados a continuación:

- Iniciación y desarrollo del fuego: en este subsistema los métodos son pensados para reducir la probabilidad de las condiciones que generan la ignición o la tasa de desarrollo del fuego.
- Propagación, producción y control del humo: se persigue con esto reducir los riesgos producto del humo.
- Detección y notificación del fuego: donde se requiera que la presencia de fuego sea detectada y se dé aviso a los ocupantes para activar el protocolo de emergencia.
- Supresión del fuego: ya sea con sistemas automáticos (rociadores automáticos) o sistemas manuales.
- Comportamiento humano y medios de egreso: esto para poder controlar los recorridos de evacuación y el tiempo de la misma.
- Protección pasiva: esta incluye toda la serie de estrategias que puedan limitar o impedir el colapso de toda la estructura o parte de ella.

2.5.7. Informe de diseño

Antes de desarrollar todos los criterios anteriormente citados es importante se realice un informe del diseño, donde en cada etapa se expongan los criterios que serán evaluados ante los inversionistas con el fin de llegar a un acuerdo entre éstos y los ingenieros. Si esto no se realiza y algún objetivo es cambiado por el inversionista o

alguna estrategia no es del agrado del último, todo el trabajo desarrollado hasta el momento deberá ser descartado. Para cuantificar dichos escenarios es necesario entender, los conceptos presentados en las siguientes sub secciones.

2.5.7.1. Cuantificación de los escenarios de fuego

Una vez que se haya alcanzado un acuerdo con los escenarios de fuego, se requiere que estos sean cuantificados en orden de las características del edificio, las de los ocupantes y las del fuego en sí. Es notorio que de no tener el suficiente cuidado con esta parte del análisis se puede extender y causar confusión. Es por esta misma razón que el SFPE recomienda estos sean agrupados como sigue:

- Características del edificio: aquí se describen las características físicas y ambientales (interno y externo) del edificio, las cuales afectan directamente factores como la evacuación de la población, la propagación del humo y el fuego. Son recomendadas por el SFPE características tales como la arquitectura, la estructura, la carga de fuego, los componentes del egreso, el sistema de protección contra incendios, ventilación, operación del edificio y los factores ambientales tales como la velocidad del viento y la temperatura.
- Características de los ocupantes: en este apartado y en cualquier diseño que involucre la seguridad humana es fundamental determinar las características de los ocupantes, entre las que destacan: número y densidad de la población, población sola o en grupo, condición de los ocupantes, cultura, edad, familiaridad de los individuos con el edificio, habilidad física y cognitiva, entre otras.
- Curvas de fuego: las características del incendio serán típicamente cuantificadas como curvas de diseño y ellas registran el tamaño del fuego en términos de liberación de calor en función del tiempo. Es notorio que realizar una curva para cada tipo de material es una labor sumamente extensa, y debido al enfoque del trabajo de investigación, el hecho de contar con una curva para cada tipo de combustible se escapa de los alcances, por lo que se realiza una aproximación de curvas para poder trabajar de manera eficiente. La curva de

fuego de la Figura 11 representa el comportamiento idealizado de cada combustible que entra a reaccionar con una fuente de calor en presencia de oxígeno en función del tiempo (reacción en cadena).

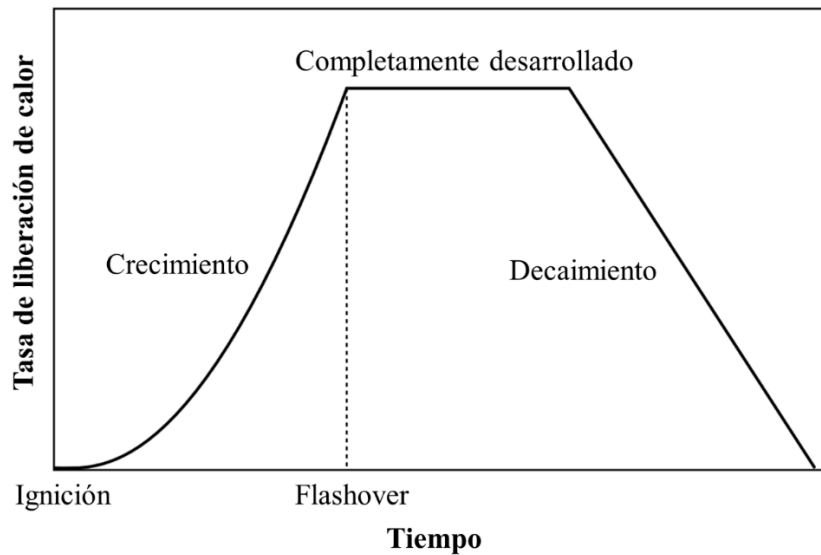


Figura 11. Curva idealizada del comportamiento de un incendio. (SFPE, 2016)

2.5.7.2. Evaluación de los diseños de prueba

Según la SFPE (2007), la etapa de evaluación de los diseños de prueba es el proceso de determinar si un diseño cumple con cada uno de los criterios de desempeño. En esta etapa, la evaluación es en función de factores tales como la complejidad de la geometría del edificio y la interacción de los subsistemas del edificio. Por tal motivo, se discutirá en los siguientes párrafos los niveles de evaluación recomendados por la guía del SFPE.

- Evaluación de un subsistema: la evaluación de un subsistema consiste en el análisis de un simple componente como podría ser un medio de egreso, el sistema de detección, el de supresión o una compartimentación. Este análisis es típico cuando se requiere brindar una estrategia alternativa a un código ya establecido, por lo que el subsistema analizado debería estar en un nivel superior o igual de protección al descrito por el código.

- Evaluación de un sistema: al igual que con el análisis de subsistemas, en esta etapa los sistemas son evaluados en contra al código prescriptivo. La evaluación de un sistema requiere más complejidad que la necesaria con un subsistema, ya que el sistema es función de los subsistemas que contiene, por lo tanto se puede analizar en dos perspectivas: primero, en términos de los subsistemas que se presentan; y segundo, contra los demás sistemas presentes dentro de la edificación. Este último es recomendado por el SFPE cuando se presenta una estructura en la que coexisten varios sistemas y donde el análisis de subsistemas no sea útil en términos de comparativas.
- Evaluación del edificio completo: Este análisis aborda de manera integral todas las metas (“*goals*”) que se desean proteger del fuego, como son los ocupantes, la propiedad, el medio ambiente y otros. Para este tipo de análisis se recomienda que se utilicen las herramientas ingenieriles adecuadas para poder alcanzar o exceder las metas propuestas en las primeras etapas del diseño.

Finalmente, para que todo esto pueda ser verificado, criticado, comprendido, y los interesados puedan ir generando sus propios criterios a la hora de implementar los diseños, es necesario que se documente cada parte del proceso y pueda ser consultado en el futuro. Esto es llamado informe de diseño o análisis, dependiendo del objeto en estudio. Debe ser preparado para una audiencia en general por lo que su redacción debe estar libre de las ambigüedades y en el incluir los riesgos, peligros y comportamiento esperado a lo largo de su ciclo de vida.

Es necesario que como mínimo este conste de las siguientes partes

- Alcance del proyecto.
- Participantes del proyecto
- Aptitudes del equipo de trabajo
- Metas y objetivos
- Criterios de desempeño
- Escenarios de incendio
- Diseño final

- Evaluación del diseño final
- Aspectos e hipótesis críticos del diseño
- Referencias

Con esta etapa, se finaliza el análisis basado en desempeño según la metodología de propuesta por la SPFE.

2.6. Sistemas de detección, supresión de incendios y compartimentación

Como herramienta para poder cumplir con los objetivos de protección contra incendios se implementan sistemas de protección contra incendios en los edificios. A seguir se detalla la clasificación, características y aspectos normativos importantes por conocer.

2.6.1. Tipos de sistemas

La protección contra incendios se basa principalmente en 2 grandes tipos de sistemas, los cuales son los pasivos y los activos.

Los sistemas pasivos son aquellos que no atacan directamente al fuego, su propósito no es el de extinguir el incendio. Este tipo de sistemas se basa en brindar al ocupante los medios suficientes para una evacuación segura.

Por lo tanto, el objetivo principal de los sistemas pasivos contra incendio es la seguridad humana. La cual se pretende alcanzar con medios de egreso seguros mediante compartimentación y una detección y notificación temprana en caso de un incendio, para alertar a los ocupantes e iniciar la evacuación por los medios de egreso seguros y compartimentados.

2.6.2. Sistemas de supresión

Para la protección contra incendio, existen una gran gama de sistemas de supresión de incendio. Desde extintores hasta aplicaciones más específicas como sistemas de espuma o de gases limpios. La elección del sistema de supresión a utilizar va depender del tipo de riesgo a proteger.

En el caso de edificaciones de reunión pública como es el caso del presente trabajo, se utilizan en su mayoría los siguientes 3 tipos de sistemas de supresión contra incendio:

a) Extintores portátiles: la selección del tipo de extintor se debe realizar considerando lo siguiente:

- La naturaleza de los combustibles presentes
- Las condiciones ambientales del lugar a ubicar los extintores
- Personal encargado del uso del extintor
- El mantenimiento requerido

La normativa aplicable a este tipo de sistemas es:

- Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.
- NFPA 10 Estándar para Extintores Portátiles Contra Incendios.

b) Sistemas fijos de protección contra incendio manuales basados en gabinetes de manguera: los sistemas basados en mangueras tienen como objetivo principal dotar a las brigadas contra incendio del edificio y especialmente a los cuerpos de bomberos, puntos de acceso a agua en lugares seguros como lo son medios de egreso. Esto para poder atacar al incendio y controlarlo hasta poder extinguir el mismo.

Existen 3 tipos de sistemas manuales:

- Sistemas fijos manuales Clase I: Consisten en salidas angulares de 64mm para uso exclusivo del cuerpo de bomberos. Se considera un sistema auxiliar al de rociadores automáticos.
- Sistemas fijos manuales Clase II: Consiste en salidas de 38mm con manguera, este es para uso de los brigadistas del edificio. Los cuales, a pesar de no ser bomberos, tienen práctica con la manipulación de estos sistemas. El sistema pretende ser utilizado para controlar la propagación del incendio mientras llegan las unidades de rescate.

- Sistemas fijos manuales Clase III: Consisten en gabinetes con salidas combinadas de 38 mm con manguera para uso de brigadas del edificio, de salidas angulares de 68 mm para uso de exclusivo del cuerpo de bomberos. Debido a que es una mezcla entre sistema Clase I y Clase II su distribución y diseño se realiza a partir de los requerimientos del sistema más demandante, el sistema Clase I.

La normativa aplicable en Costa Rica es:

- Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.
- NFPA 14 Estándar para Instalación de Tubería Vertical y Sistemas de Mangueras.

- c) Sistema fijo de protección contra incendio basado en rociadores automáticos: los rociadores automáticos son dispositivos termo-sensibles, ajustados para activarse al alcanzar la temperatura de diseño. Al activarse, descargan agua en patrón de descarga tal que toda el área a proteger quede cubierta con agua. El sistema de rociadores tiene como objetivo el control del incendio, mediante el agua se baja la temperatura del lugar; atacando el fuego por “enfriamiento”. A pesar de que los rociadores en su mayoría no son para extinguir el fuego, por lo general terminan extinguiendo dicho fuego.

La normativa aplicable en Costa Rica es:

- Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.
- NFPA 13: Estándar para Instalación de Sistemas de Rociadores Automáticos.

2.6.3. Sistemas de detección y alarma

Un sistema de detección y alarma es un sistema que permite advertir de manera temprana a los ocupantes de un edificio o recinto mediante una señal audible y/o visual, en caso de un incendio.

El sistema de detección es el primero en actuar, como bien su nombre lo dice, detecta mediante detectores, sensores o incluso actuación manual si algo anómalo está sucediendo en el edificio.

Dentro de los dispositivos con los que cuenta el sistema de detección están los siguientes:

- Detectores de humo
- Detectores de temperatura
- Estaciones manuales de incendio
- Sensores de apertura en puertas de los medios de egreso
- Sensores de flujo en las tuberías de los sistemas de supresión de incendio
- Sensores de arranque de la bomba principal del sistema de supresión de incendios

Una vez detectado el conato de incendio, el sistema de notificación actúa. Este se encarga de alertar a los ocupantes del edificio mediante señales audibles visuales para que inicien la evacuación del lugar.

El sistema de notificación está conformado principalmente por los siguientes elementos:

- Altavoces
- Sirenas
- Luces estroboscópicas
- Paneles de notificación remoto

2.6.4. Compartimentación contra incendios

La compartimentación se realiza mediante muros cortafuego, los cuales consisten en paredes resistentes a la exposición del fuego por determinado tiempo (entre 1 hora a 2 horas típicamente) sin ceder o presentar falla estructural alguna. Evitan la propagación directa del fuego, humo y calor a través de los recintos del edificio a proteger.

En términos generales, el uso de la compartimentación se da en los siguientes casos:

- a) Aislar un espacio que contenga un riesgo más elevado que el riesgo general del edificio o nivel de piso en estudio.
- b) Minimizar la posibilidad de propagación del fuego para mitigar las pérdidas económicas que pueda sufrir los ocupantes del edificio.
- c) Para la construcción de los medios de egreso. Esto para asegurarle al ocupante un recorrido seguro desde su ubicación dentro de un recinto particular hasta la zona de descarga de los medios de egreso disponibles.

La compartimentación es un sistema de protección pasivo. El cual su objetivo primordial es la seguridad humana.

Dentro de las normativas aplicables a la compartimentación están:

- Manual de Disposiciones Técnicas Generales Sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.
- NFPA 1: Código del Fuego
- NFPA 101®: Código de Seguridad Humana®
- NFPA 5000®: Código de Seguridad y Construcción de Edificios®

2.7. Modelos de simulación de incendios

Existen gran número de modelos de simulación de incendios, sin embargo, cuando se refiere a la protección contra incendios basada en desempeño, el número se reduce

a dos tipos: el modelado del incendio y el modelado de la conducta humana en caso de emergencias.

Se necesita conocer el tiempo del que se dispone antes de que las condiciones de sostenibilidad para los ocupantes se pierdan. Es por eso que se habla de dos tiempos: el RSET (tiempo dependiente de los ocupantes) y el ASET (tiempo dependiente del incendio). En lo que respecta a simulación de incendios existen varios modelos que satisfacen lo requerido y que se profundizarán a continuación.

2.7.1. Modelado del incendio

La simulación de las condiciones y fenómenos presentes en el incendio puede ser vista desde dos frentes de modelado, y se conocen como modelado de zona y análisis computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés).

2.7.1.1. Modelado de zona

Consiste en la suposición de que en un incendio de diseño o de recinto cerrado, el cual se asume constante el volumen de control analizado, identificándose entonces una capa de aire caliente y otra capa de aire fría, en la cuales son aplicadas las ecuaciones de conservación de la energía. La Figura 12 ejemplifica la manera en que se conceptualiza este modelo. Se pueden suponer dos volúmenes de control y analizar sus condiciones fronteras en función del intercambio energético mediante el calor.

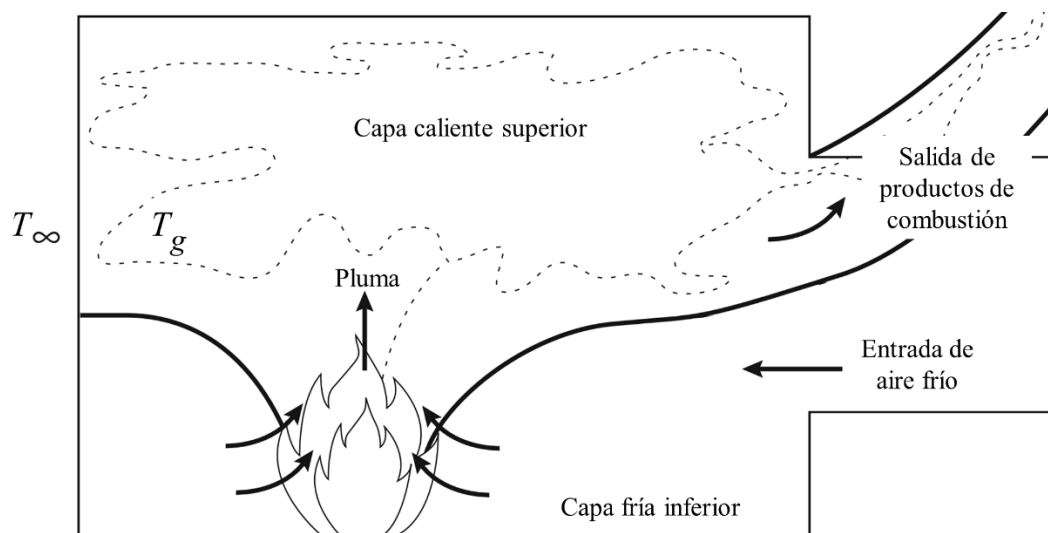


Figura 12. Análisis de capas caliente y capa fría. (SFPE, 2016)

Este modelo no toma en cuenta efectos críticos, como lo son las explosiones, “flashover” y re incendios; sin embargo, logra predecir variables como la temperatura y altura de capa caliente, degradación de los materiales, la deposición de productos de combustión, propagación del fuego a través de la superficie, penacho de la flama y respuesta a detectores de humo y temperatura.

2.7.1.2. Dinámica computacional de fluidos (CFD)

La dinámica computacional de fluidos no es una rama exclusiva de la protección contra incendios, de hecho del desarrollo del análisis de los fluidos parte el desarrollo de la modelación de los incendios.

Además, se debe reconocer que debido a los avances en la computación y el entendimiento que se ha adquirido del fenómeno del fuego a partir de los experimentos de la última década, han logrado hacer del método CFD uno de los más integrales en cuanto a modelado se refiere. Su base es el estudio de las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, integrando el modelado de la turbulencia, además de información de la fuente y las condiciones límite, transformando los datos anteriores en resultados numéricos. Por esa razón, se considera que el modelado CFD es uno de los más completos existentes.

El NIST pone a disposición pública el simulador de dinámica del fuego FDS, el cual es un poderoso simulador, capaz de modelar y resolver numéricamente las ecuaciones apropiadas de Navier-Stokes para el flujo de baja velocidad impulsado térmicamente por el humo y el transporte de calor de los incendios. La última característica flexibiliza el uso del mismo, ya que no solamente puede ser usado para resolver escenarios de fuego, sino que también puede ser empleado para predecir el comportamiento de la ventilación de un edificio.

Además, para visualizar todo lo mencionado anteriormente, el NIST desarrolló la herramienta “*smokeview*”, con la cual se enlazan todos los componentes anteriores, dando como resultado el comportamiento gráfico de las variables estudiadas.

FDS está orientado a resolver problemas prácticos de incendios en la ingeniería de protección contra incendios, al mismo tiempo que proporciona una herramienta para estudiar la dinámica y la combustión fundamental de los incendios. Este programa se puede utilizar para modelar los siguientes fenómenos:

- Transporte a baja velocidad de calor y productos de combustión del fuego.
- Transferencia de calor por radiación y convección entre el gas y las superficies sólidas.
- Pirolisis.
- Propagación de llamas y crecimiento del fuego.
- Activación de rociadores, detectores de calor y detectores de humo.

Aunque solo se puede almacenar una pequeña fracción de la información calculada, la salida generalmente consiste en archivos de datos bastante grandes. Los datos numéricos típicos de salida para la fase de gas incluyen:

- Temperatura del gas.
- Velocidad del gas.
- Concentración de especies de gases (vapor de agua, CO₂, CO, N₂).
- Estimaciones de concentración de humo y visibilidad.
- Presión.
- Velocidad de liberación de calor por unidad de volumen.
- Fracción de la mezcla (o relación aire / combustible).
- Densidad de gases.
- Masa de agua por unidad de volumen.

2.7.2. Modelado de la evacuación

El cálculo del RSET es de las principales partes dentro del análisis basado en desempeño, y a la vez una de las más difíciles de estimar, debido a que se deben

cuantificar detalles tales como el comportamiento humano, la velocidad humana a través de diferentes tipos de recorrido como lo son escaleras, pasillos, entre otros.

Para realizar una simulación cercana a la realidad, se requiere determinar los parámetros descritos a continuación:

- Tamaño físico de los humanos simulados: es relevante para modelar adecuadamente la salida a través de lugares cerrados como ascensores, escaleras y pasillos.
- Velocidad máxima y mínima de movimiento: pueden asignarse valores específicamente a agentes individuales, o distribuirse aleatoriamente a cada persona simulada.
- Tiempo de respuesta de un agente: el intervalo de tiempo entre la primera vez que una persona escucha una alarma o señal hasta que comienza a salir del edificio, el cual varía dependiendo de su situación particular.

3. Análisis de protección contra incendios basado en el desempeño

Para el análisis basado en el método de desempeño realizado fue necesario estudiar y tener en consideración distintos aspectos como: la normativa aplicable en materia de incendios, el análisis del riesgo, el modelado computacional, el procedimiento seleccionado para llegar al resultado obtenido y la recolección de datos y estadísticas.

Basado en lo anterior, a seguir se detalla el desarrollo del análisis de seguridad humana basado en el desempeño en caso de incendio del edificio de la facultad de ingeniería de la Universidad de Costa Rica.

3.1. Normativa competente al análisis por desempeño.

El primer paso para realizar el análisis mostrado fue determinar las bases de la investigación, razón por la cual son mencionadas en Cuadro 2, las principales referencias y se dividieron en tres grupos los cuales son los siguientes:

- Códigos desarrollados por consenso (NFPA), organizaciones elaboradoras de códigos u organismos gubernamentales.
- Referencias técnicas (expuestas a revisión), revistas de prestigio e informes.
- Publicaciones de apoyo ampliamente reconocidas (SFPE).

Cuadro 2. Referencias utilizadas en el análisis. (Los Autores, 2018)

Función	Nombre	Tipo de referencia
Análisis por desempeño	Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, Manual de Disposiciones Técnicas Generales Sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios, Versión 2013	Publicación de apoyo
	NFPA 101®: Life Safety Code®	Código por consenso
	SFPE Engineering Guide to Performance Based Fire Protection, 2 nd Edition	Publicación de apoyo
	ISO 23932:2009 - Fire safety engineering -- General principles	Código por consenso
	ISO/TS 16733:2006 Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires	Código por consenso
	Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, Análisis e investigación de incendios al 31 de diciembre 2017	Referencia técnica
	Handbook of Occupational Safety and Health, 2 nd Edition (Lou Diberardinis), “Chapter 6: Risk Assessment Techniques,”	Publicación de apoyo
Simulación de evacuación	Performance-Based Fire Safety Design (Morgan J. Hurley, Eric R. Rosenbaum)	Publicación de apoyo
	ISO/TR 16738:2009 Fire-safety engineering -- Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people	Código por consenso
	IMO MSC.1/Circ.1238 Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships	Referencia técnica
	SFPE Guide to Human Behavior in Fire, 2 nd Edition	Publicación de apoyo
Simulación de incendios	NIST Technical Note 1680A Review of Building Evacuation Models, 2 nd Edition	Publicación de apoyo
	NFPA 72®: National Fire Alarm and Signaling Code®	Código por consenso
	NFPA 70®: National Electrical Code®	Código por consenso
	NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems	Código por consenso
	NIST NCSTAR 1-5C Fire Test of Single Office Workstations	Referencia técnica
	NIST Special Publication 1018 Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide.	Referencia técnica

Como se puede observar, la función a la cual está ligada la referencia depende de la etapa en el desarrollo del análisis, sin embargo, existe un amplio número de referencias y además estas se usaron entre ejes temáticos, como por ejemplo la guía del SFPE.

Por lo cual el anterior cuadro sirve solo como material de consulta rápido para el entendimiento de la metodología de análisis.

3.2. Programas computacionales

Una vez establecido el tipo de análisis a realizar, se procedió a buscar las herramientas adecuadas para realizar dicho análisis y obtener resultados confiables. Debido a la naturaleza del estudio, se basó en métodos y modelos matemáticos bastante pesados; por lo que se pretendió realizar el estudio con soporte de programas informáticos competentes y específicos a lo que se debe evaluar en el edificio.

Debido a que el análisis se dividió en dos campos, se buscaron en el mercado programas informáticos que se ajusten a las necesidades del proyecto. Teniendo como resultado la implementación de 2 programas informáticos:

- Pathfinder® para análisis las condiciones de los ocupantes y el tiempo de evacuación requerido
- PyroSim® para análisis de las condiciones del incendio y el tiempo de evacuación disponible

La selección de ambos programas informáticos se basó en los siguientes aspectos:

- Accesibilidad: Son los dos programas informáticos de manejo del asesor externo el Ing. Mauricio Meneses, por lo tanto, cualquier consulta sobre la entrada de datos, uso general de los programas informáticos, interpretación de los resultados, se pueden evacuar más fácilmente.
- Confiabilidad: Los dos programas informáticos cuentan con una gran base de datos en sus respectivas páginas para consulta de temas varios relacionados con el uso de los mismos e interpretación de resultados. Además de contar con

manuales de usuario donde explican detalladamente el manejo de los programas informáticos.

- Interfaz amigable con el usuario: Ambos programas computacionales cuentan con interfaz sencilla de manipular, debido a que presentan similitudes en herramientas con otros programas informáticos más comunes como lo es AutoCAD® de la marca Autodesk. Muchos programas encontrados son más programables y de lenguajes y algoritmos meramente matemáticos cuya implementación se vuelve más engorrosa y pesada; ambos programas elegidos para la simulación permiten introducir información de entrada básica y brindan la facilidad de desarrollar los algoritmos matemáticos de manera automática.
- Resultados fáciles de interpretar: Los resultados brindados por ambos programas son no solo mediante una memoria y un reporte de ingeniería, sino que también brinda resultados por medio de gráficas, imágenes y videos. Los cuales son medios muy visuales de menos complejidad de entendimiento, ayudando no solo al análisis de los resultados sino también brinda una forma más clara de exponer los resultados a personas ajenas al estudio.

3.3. Modelado tridimensional

El modelado tridimensional necesario para las dos simulaciones, fue dividido en tres etapas, de las cuales la primera es descrita a continuación y las dos restantes serán descritas en las secciones 3.7 y 3.8 de este capítulo.

En cuanto a la primera etapa, se comenzó completando el modelo tridimensional, lo cual consistió en dibujar la estructura y establecer las áreas de estudio.

Para el modelado PyroSim® , se requirió importar y centrar los planos de acuerdo a los ejes, mientras que para Pathfinder®, el proceso fue un poco extenso ya que demandó además de importar y centrar los planos, generar los pisos (área por la cual los ocupantes transitan), los cuartos donde se encontraban los ocupantes, también generar las obstrucciones de mobiliario como por ejemplo, sillas, mesas, repisas y

bodegas, además de generar las puertas, escaleras y salidas por las cuales los ocupantes realizaron el proceso de evacuación.

Los planos fueron facilitados por la UCR en formato "pdf", el mismo que posteriormente tuvo que ser convertido a formato "dwg" mediante el uso del programa AutoCAD® de la compañía desarrolladora Autodesk, con esto el proceso de modelado resulto mucho más sencillo ya que el formato "dwg", trabaja con capas (*layer*), las cuales fueron apagadas para poder continuar el modelado.

3.4. Análisis del riesgo

La NFPA 101 (2018) en el Capítulo 5, establece las pautas a seguir en el análisis por desempeño basado en seguridad humana, mismo que se realizó en el edificio de ingeniería de la UCR, Sede Central. Este indica que los primeros pasos para realizar dicho análisis es establecer los escenarios de incendio a evaluar.

Basados en la meta de seguridad humana se utilizó la norma en su capítulo 4, el cual detalla el nivel de protección requerido, dicho nivel es dividido en supervivencia de los ocupantes involucrados con el incendio y protección los ocupantes involucrados con el incendio de manera indirecta. El Cuadro 3 resume las metas definidas.

Cuadro 3. Resumen de metas. (Los Autores, 2018).

Tipo de meta	Descripción
Supervivencia	Corroborar la supervivencia de las personas que se encuentran involucradas en el escenario de fuego.
Protección	Corroborar que la protección es la necesaria para que los ocupantes no involucrados con el fuego de manera directa no se vean afectados en su proceso de evacuación del edificio.

La misma normativa establece los 4 métodos para establecer el análisis por desempeño, los cuales se detallan a continuación:

- Método 1: asegurar que los ocupantes no serán incapacitados por los efectos del fuego, entre ellos visibilidad, daño térmico y toxicidad.
- Método 2: demostrar que cada área será evacuada completamente antes de que los ocupantes se vean expuestos a los efectos del fuego (Pérdida de visibilidad, daño térmico y toxicidad).
- Método 3: demostrar que la capa de humo y gases tóxicos no descenderá en cualquier cuarto ocupado, de manera que los que los ocupantes se vean expuestos a los efectos del fuego (Pérdida de visibilidad, daño térmico y toxicidad).
- Método 4: demostrar que ningún cuarto ocupado se verá afectado por los efectos del fuego.

De los cuatro métodos anteriores, se seleccionó solamente uno para realizar el análisis. Se utiliza el que más se adecua al alcance y propósito de este.

El método 4 es el más conservador de todos, ya que en este no se requiere realizar evacuación de los ocupantes, dado que el objetivo de este método es demostrar que ningún cuarto ocupado se verá afectado por incendio. Dado esto, se descartó por no considerar el alcance del proyecto el cual es realizar un análisis de la evacuación del edificio.

En el método 3 el objetivo es demostrar que la capa de humo y gases tóxicos no descenderán a niveles peligrosos para los ocupantes, por lo que no se verán afectados. Por lo tanto, este método tampoco involucra las características de los ocupantes y la evacuación del edificio en caso de incendio, es por este motivo que se descartó este método.

El método 1, si bien es cierto es de los menos conservadores de la lista, define una serie de condiciones que se deben conocer de antemano como la fracción de dosis efectiva respirada para incapacitar a los ocupantes lo cual sugiere realizar un análisis químico de la combustión, lo cual se aleja del alcance del proyecto el cual es hacer una comparación entre el ASET y RSET; por lo tanto, este método se descartó.

Finalmente, se seleccionó el método 2 para realizar el análisis ya que es el más adecuado para cumplir con las metas del proyecto, debido a que se consideran las características de los ocupantes y el fuego en caso de evacuación.

El Cuadro 4 resume las metas, los objetivos y los criterios de desempeño utilizados en el análisis.

Cuadro 4. Resumen criterios de desempeño. (Los Autores, 2018)

Meta de protección contra incendios	Objetivo de diseño	Criterio de desempeño prescrito	Criterio específico
Protección de los ocupantes que no están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego [NFPA 101:4.1.1(1)]	Una estructura debe ser diseñada, construida y mantenida para proteger los ocupantes que no están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego durante el tiempo necesario para ser evacuados, reubicados o defendidos en el lugar [NFPA 101:4.2.1]	Un ocupante que no esté relacionado íntimamente con la ignición no debe estar expuesto a condiciones instantáneas o acumulativas insostenibles [NFPA 101:5.2.2]	Mantener los niveles visibilidad (4,0 m) y daño térmico debajo del nivel máximo apto para sobrevivir y evacuar el escenario del fuego.

Mejoramiento de la capacidad de supervivencia de los ocupantes que están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego [NFPA 101:4.1.1(2)]	Los sistemas utilizados para lograr las metas de la Sección 4.1 deben ser efectivos para mitigar el riesgo o condición para la que están siendo utilizados, deben ser confiables, deben mantenerse en el nivel para el que fueron diseñados para operar, y deben permanecer en funcionamiento [NFPA 101:4.2.3]	Un ocupante que no esté relacionado íntimamente con la ignición no debe estar expuesto a condiciones instantáneas o acumulativas insostenibles [NFPA 101:5.2.2]	Mantener los niveles visibilidad (4,0 m) y daño térmico debajo del nivel máximo apto para sobrevivir y evacuar el escenario del fuego.
---	--	---	--

La misma norma establece 8 escenarios típicos a considerar en cualquier edificación en general, los cuales son:

- |Escenario de diseño 1: es un escenario que represente un incendio típico de la ocupación analizada.
- Escenario de diseño 2: es un incendio de tipo ultra rápido desarrollado cerca o en los medios principales de egreso y estos con las puertas interiores abiertas.
- Escenario de diseño 3: un incendio que empiece en una ocupación normalmente cerrada y que puede poner un gran número de ocupantes en riesgo.
- Escenario de diseño 4: un incendio que se origine en una pared o cielo que este junto a un salón grande y ocupado.

- Escenario de diseño 5: un incendio de tipo lento no alcanzado por el sistema de protección contra incendios en cercana proximidad de un área de gran ocupación.
- Escenario de diseño 6: es el incendio más severo que se pueda obtener debido un gran número de combustibles agrupados debido a la operación normal del edificio.
- Escenario de diseño 7: es un incendio de exposición exterior que se propaga y desarrolla condiciones intolerables dentro del área.
- Escenario de diseño 8: es un incendio de combustibles ordinarios con los sistemas pasivos y activos de protección de incendios independientemente ineficaces.

Por lo tanto, se debieron analizar los casos y establecer cuáles son aplicables o no a la edificación en estudio. Con ayuda de los planos del proyecto se ubicaron escenarios con altas probabilidades de ocurrencia y que afecten los medios de egreso.

Una vez ubicado en planos los posibles escenarios de diseño, se realizó una visita a sitio para realizar un levantamiento visual y fotográfico para verificar las propuestas de ubicación de los escenarios en planos. Se validaron las cargas de combustibles reales en sitio.

Posterior a la visita, se seleccionó a partir de la comparación entre escenarios del fuego descritos en la NFPA 101 con las cargas reales existentes en el lugar.

El análisis del riesgo realizado, contiene factores del incendio como el nivel de ocurrencia, la fuente de ignición, la respuesta y el tipo de escenario aplicable y se puede apreciar en el Anexo A.

3.5. Selección de escenario crítico para la simulación.

La selección del escenario fue determinada siguiendo las recomendaciones brindadas por la NFPA 101 (2018), en su capítulo de diseño por desempeño.

3.5.1. Criterios de desempeño

El criterio de desempeño principal utilizado en el análisis fue el de evacuación, el cual consto en determinar que el tiempo en el que la población evacuó el edificio fue menor al tiempo en el que la capa de humo alcanzó los 1,83 m (6 pies), altura a la cual se consideró que las condiciones de sostenibilidad serian perdidas en los medios de egreso.

Resultado del anterior objetivo fue necesario cumplir con dos criterios de desempeño vinculados a la altura de capa caliente, estos fueron el criterio de visibilidad y el criterio de daño térmico a las vías respiratorias.

Es necesario destacar que el criterio de toxicidad no fue tomado en cuenta dentro del análisis debido a que la teoría indicó que para comenzar a experimentar los efectos de la inhalación de productos de combustión el tiempo requerido es alto en comparación con los dos criterios anteriores.

3.5.1.1. Visibilidad

Para alcanzar el criterio de desempeño de visibilidad fue necesario dividir el tipo de población en dos según la zona del incendio y estos fueron los ocupantes familiarizados con el edificio y los no familiarizados.

La visibilidad limita la orientación de las personas y esto es dependiendo del tipo de función que se ejerza, para este punto la población de ocupantes familiarizados se redujo a personal administrativo, profesores, personal de limpieza y mantenimiento los cuales en caso de evacuación solamente tienen que tener visibilidad para orientarse y así encontrar la salida.

Para la población no familiarizada, es decir los estudiantes y visitantes, el criterio indicó que la visibilidad desde cualquier punto debe ser mayor capaz de poder distinguir las salidas y señales de emergencia.

El Cuadro 5 muestra los valores de referencia usados para la selección de escenarios críticos, tomados de la tabla 61.3 del SFPE.

Cuadro 5. Densidad de capa de humo y visibilidad permitidos para los ocupantes (SFPE, 2016)

Grado de familiaridad con el edificio	Coefficiente de extinción [OD/m]	Visibilidad (m)
No familiarizado	0,15	13,0
Familiarizado	0,5	4,0

3.5.1.2. Daño térmico

Además de la altura de capa gases fue necesario garantizar que los ocupantes no se expusieran a la inhalación de gases calientes por tiempos prolongados, esto debido a que el daño en las vías respiratorias se produce cuando se respiran gases a 60 °C en una atmosfera húmeda. El Cuadro 6 resume las condiciones límite de exposición al calor, los datos fueron tomados de la tabla 63.20 del SFPE (2016).

Cuadro 6. Condiciones límite de exposición al calor (SFPE, 2016)

Medio de transferencia	Intensidad	Tiempo de tolerancia
Radiación	< 2,5 kW*m ⁻²	>5 min
	2,5 kW*m ⁻²	30 s
	10 kW*m ⁻²	4 s
Convección	< 60° C @ 100% saturado	>30 min
	100° C < 10%	12 min
	120° C < 10%	7 min
	140° C < 10%	4 min
	160° C < 10%	2 min
	180° C < 10%	1 min

3.5.2. Selección de escenarios

El Anexo A detalla los tipos de escenario presentes en la estructura, el único escenario no contemplado fue el número 4. Este advierte de la consideración de un incendio en un espacio oculto donde el sistema de alarma y supresión no lo puedan alcanzar, como por ejemplo un cielo raso. Se determinó que la única forma que ocurra sería un incendio en la instalación eléctrica, sin embargo, esto fue descartado debido a la suposición de que el edificio es una construcción nueva y cuenta con documentos que certifican a la instalación como ignífuga.

El mismo criterio fue utilizado para descartar el escenario número 8, que advierte de un incendio en el cual los sistemas de detección y supresión se encuentran fuera de servicio, se consideró que el sistema de detección y supresión funcionaria de acuerdo a lo esperado en el instante del análisis.

Se consideraron los escenarios 2, 5, 6, 7, pero no fueron tomados en cuenta para el análisis final debido a que su probabilidad de ocurrencia según la estadística del BCBCR fue baja. Además, las curvas de incendio en muchos de los casos no pudieron ser consultadas y por ello no se pudo determinar el tiempo en el cual el HRR máximo fue alcanzado, esto debido que la fuente de consulta NCFS eliminó la información previamente existente.

El Cuadro 7 muestra un extracto del análisis del riesgo del Anexo A, en específico el primer nivel.

*Cuadro 7. Resumen de escenarios, primer nivel, edificio administrativo
(Los Autores, 2018)*

Nivel	¿Qué pasa si...	Probabilidad	HRR [kW]	Tiempo [s]	Escenario NFPA 101
	Hay un incendio en el comedor?	Baja	10	596	1
	Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Baja	1752	desconocido	2
	Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Baja	1600	desconocido	3
	Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Baja	1600	desconocido	3
1	Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	Baja	no se conoce	desconocido	5
	Hay un incendio en la estación de trabajo de la bodega de archivos del primer nivel de la facultad de ingeniería?	Baja	1600	desconocido	6
	Hay un incendio en la estación de trabajo en la secretaría del primer nivel de la facultad de ingeniería?	Baja	1440	1000	1

Hay un incendio en la estación de trabajo en la secretaría del primer nivel de la facultad de ingeniería y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	Baja	1440	1000	8
--	------	------	------	---

Para la selección de los escenarios final de simulación tres fueron los factores determinantes:

- El primero se refiere a los criterios de desempeño, mismos que fueron mencionados anteriormente.
- El segundo fue la curva de incendio, ya que esta indica el HRR y el tiempo en el que se alcanza, debido al tipo de análisis se buscó un incendio que afectara los medios de egreso y cuya HRR estuviera disponible para efectos de consulta y validación.
- El tercer factor fue el tiempo de simulación, y debido a que para realizar el análisis se convino alimentar la información tanto del comportamiento del fuego mediante PyroSim® como la de evacuación mediante Pathfinder®, ambos programas demandan tiempo de resolución de sus distintas ecuaciones de control y la graficación de los mismos.

Siguiendo los criterios anteriores, el Cuadro 8 muestra el resultado del análisis del riesgo efectuado del cual solamente tres escenarios fueron los seleccionados.

Cuadro 8. Escenarios críticos seleccionados (Los Autores, 2018)

Localización	Escenario NFPA	HRR (kW)	Área afectada	Código de plano
Hay un incendio en la estación de trabajo en la secretaría del primer nivel de la facultad de ingeniería	1	1440	Bodega archivo activo, secretaria, atención al público, sala de espera.	AA-E-E102
Hay un incendio en el comedor de administrativo del primer nivel de la facultad de ingeniería	1	1148	Oficina RID, taller equipo de cómputo, mantenimiento.	AA-E-E102
Hay un incendio en la asociación de estudiantes del segundo nivel de la facultad de ingeniería	1	3100	Área de estudio.	AA-E-E103

3.5.3. Escenario final de simulación

Para la selección final del escenario de simulación la directriz fue computar aquel que alcanzara las condiciones descritas por el criterio de NFPA, el cual describe un incendio en un área normalmente ocupada y que podría afectar a un gran número de ocupantes. Como se aprecia en el Cuadro 8, de acuerdo al área afectada, el incendio en la estación de trabajo de la secretaría de la oficina de decanato es el que se determinó que podría causar mayor daño y tiene más posibilidades de ocurrencia en comparación a los dos restantes.

La clave de la selección fue el dato extraído de la estadística del BCBCR (2018) mostrado en la Figura 13, ya que según la cantidad de incendios que anualmente

atienden, la mayoría de situaciones fueron provocadas por instalaciones eléctricas en mal estado y equipo electrónico.

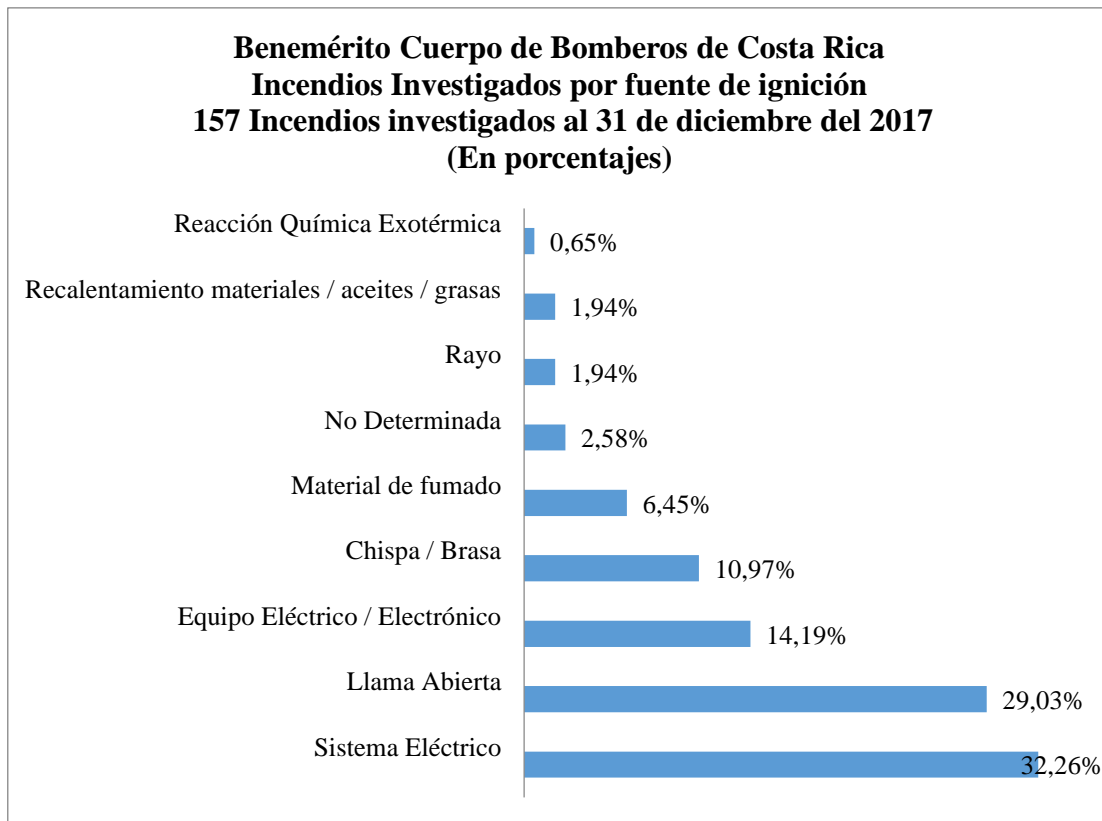


Figura 13. Fuentes de ignición de incendios según BCBCR (BCBCR, 2018)

3.5.4. Información poblacional y de carga combustible en el edificio.

Se procedió a buscar en registros del INEC, obteniendo bases preliminares de entradas para las simulaciones de evacuación.

Investigando en los informes del Programa Estado de la Nación y se encontraron bases más sólidas para la información de la población estudiantil.

En información de la página de cada escuela se encontró la información base para la población administrativa del edificio.

Una vez establecido el escenario del fuego para analizar (una estación de trabajo administrativo), mediante búsqueda en páginas web se estableció la ecuación del fuego

para un incendio en una estación de trabajo típica. Con esto se obtiene la energía liberada del mismo, base para las entradas en el programa informático de simulación de incendio.

3.6. Desarrollo del modelo de comportamiento del fuego y humo

Una vez seleccionado el escenario de diseño el siguiente paso consistió en desarrollar mediante el programa *PyroSim*®, una simulación del comportamiento del incendio de acuerdo al HRR liberado por el combustible, incluyendo las características de los elementos que lo rodean como lo son materiales, paredes, cielos, aberturas, sistema de detección y alarma además del sistema de supresión de incendios. El proceso se dividió en tres etapas.

3.6.1. Parametrización del modelado

La parametrización consistió en definir el tamaño de la celda del elemento en el modelado, mediante la relación del diámetro característico de la flama y un factor llamado tamaño nominal de la celda. Esta expresión (3.1) permite determinar qué tan correcto es resultado de la simulación resuelta por el programa informático y se muestra su procedimiento de cálculo a continuación.

$$\frac{D^*}{\delta x} = \text{número de celdas que abarcan el diámetro característico del fuego} \quad (3.1)$$

Donde:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{P_{\infty} C_P T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

$$4 \leq \delta x \leq 16$$

El Cuadro 9 describe los valores seleccionados para realizar la parametrización además del resultado del cálculo de la relación $D^*/\delta x$.

Cuadro 9. Valores de entrada para el cálculo de la rejilla (Los Autores, 2018)

Q (kW) escenario 1	1440,0	tasa de liberación de calor
ρ^∞ [kg/m ³]	1,204	densidad del aire
T _∞ [K]	297,15	temperatura ambiente del aire
C _p [kJ/kg·K]	1,005	capacidad térmica del aire
g [m/s ²]	9,81	aceleración gravitacional
4 <δx<16 (m)	8	tamaño nominal de la celda (a mayor valor mayor tiempo de cómputo)
D* (m)	1,103	diámetro característico
D*/δx	0,138	resultado sin redondeo
	0,125	resultado redondeado

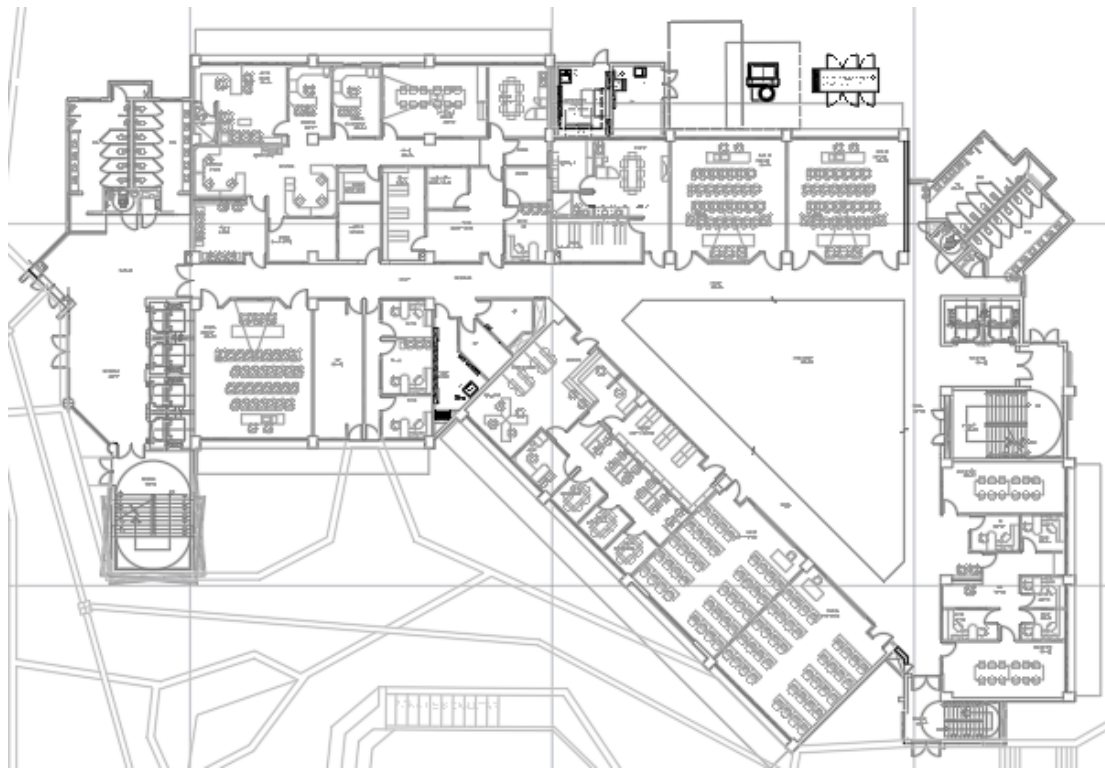
Es importante destacar, que el resultado redondeado, debió ser corregido a valores divisibles entre 5 o 10 ya que es recomendación de los desarrolladores usar valores de esa magnitud para prevenir que *PyroSim*® utilice el teorema de Stokes para la solución de las rejillas. Por lo tanto, el valor resultado fue ajustado tomando celdas de 0,125m de lado, lo que resulta en que un metro cubico de estructura fue dividido en 512 cubos para el área de conato (oficina de decanato), mientras que el tamaño para el resto del modelado fue ajustado a 0,250m ya que el modelo no requirió ser tan detallado, debido a que si las condiciones se hubiesen perdido en el área de conato el resultado para el resto de modelo hubiese sido el mismo.

3.6.2. Modelado de la estructura

Adelantándose al tiempo de resolución o tiempo de cómputo para el modelado de la estructura, fue muy importante decidir las porciones que se requerían incluir dentro de la simulación, debido al comportamiento de los productos de combustión se estimó la dirección de los gases dentro del recinto, además del criterio anterior no se contempló modelar los espacios como las aulas, baños y salidas de emergencia. Solamente se modelaron los espacios donde se esperaba que los productos causaran los peores

efectos en el recorrido de evacuación y debido a que el edificio estaba conectado entre niveles por medio de un lobby en la entrada principal y un jardín en el otro extremo los cuales permitían el ingreso de los productos a los niveles superiores fue necesario modelar también los pasillos de los demás niveles

Por tal motivo los espacios modelados son mostrados en las siguientes figuras, donde la Figura 14 representa la vista de planta del primer nivel de la estructura, lugar donde se presenta el fuego de diseño.



*Figura 14. Vista de planta de edificio administrativo, primer nivel, zona de conato
(Los Autores, 2018)*

Además de este nivel se modelaron los cinco niveles restantes bajo el criterio de la Figura 15.

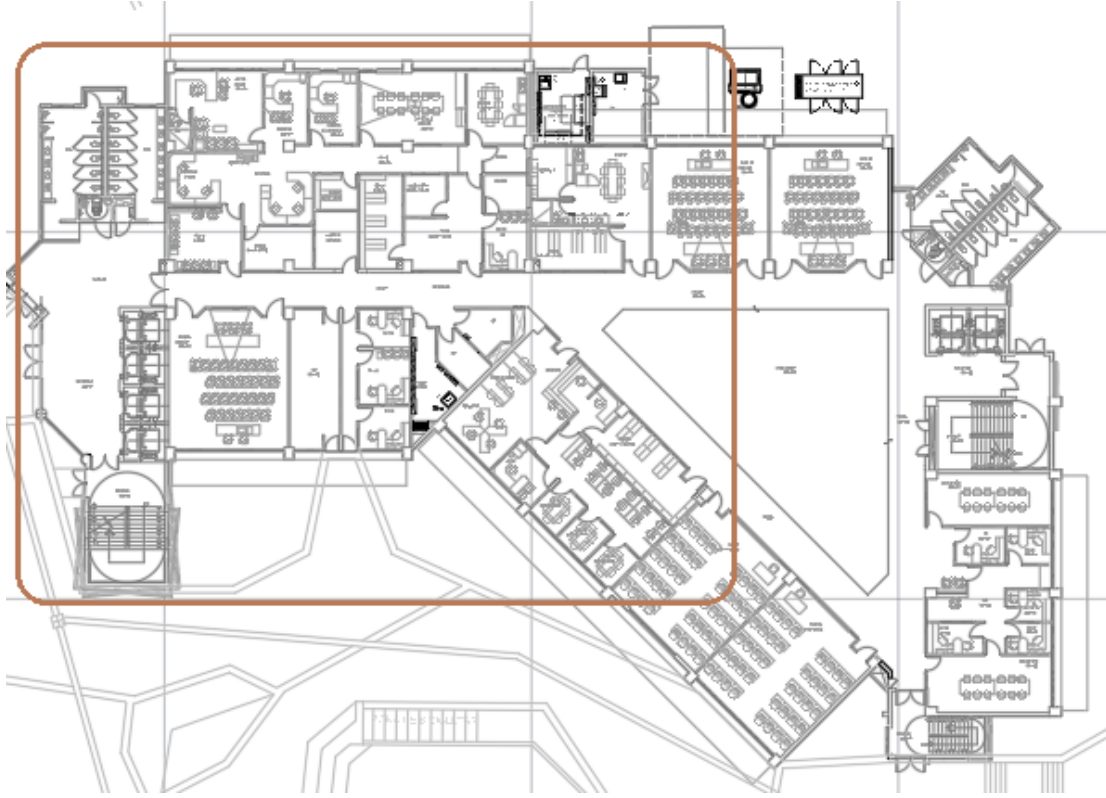


Figura 15. Vista de planta de edificio administrativo, primer nivel, zona de conato y área de modelado (Los Autores, 2018)

Finalmente, la Figura 16 y Figura 17 representan el resultado de dicho modelado

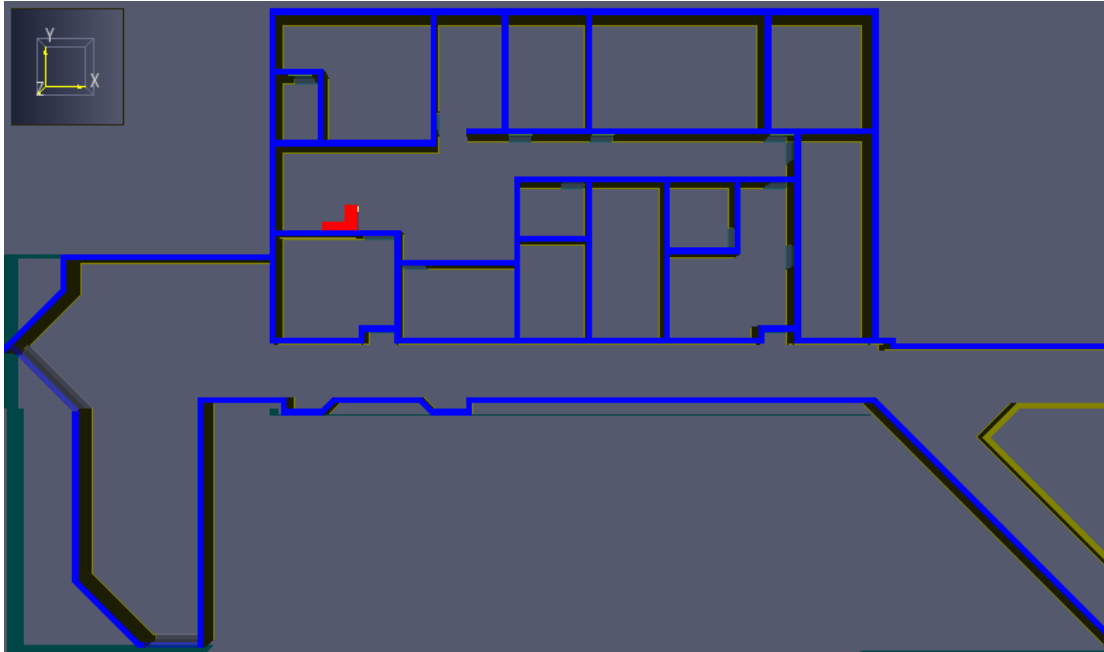


Figura 16. Modelado en PyroSim® de la vista de planta del conato y pasillos del primer nivel (Los Autores, 2018)

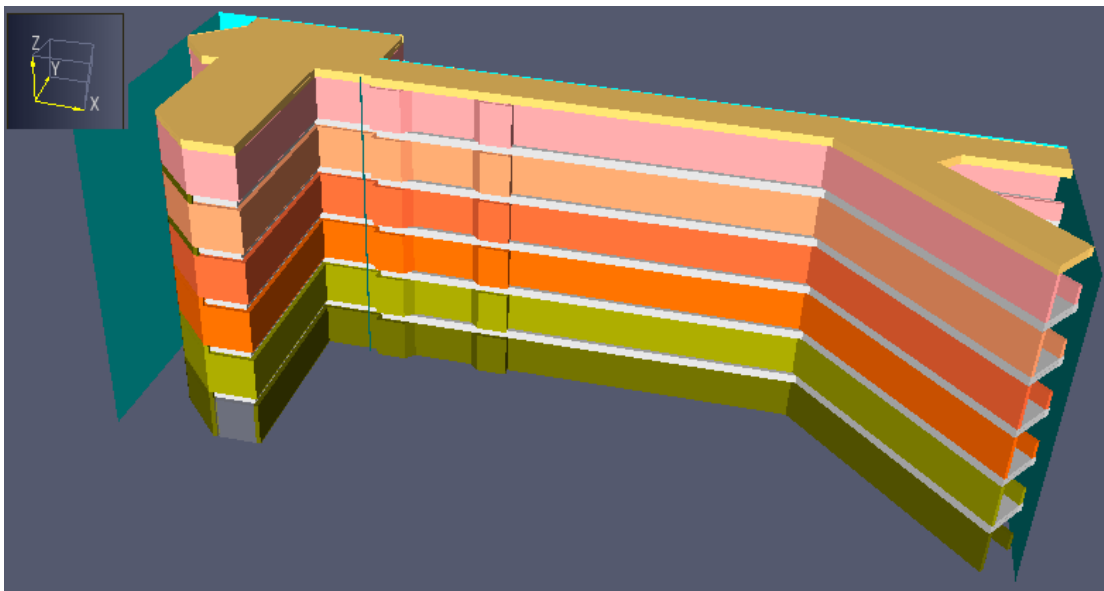


Figura 17. Modelado en PyroSim® de vista tridimensional de todos los niveles (Los Autores, 2018)

3.6.3. Creación del incendio de diseño

La creación del incendio fue dividida en dos etapas la primera es física dentro del contexto de modelar las dimensiones de la fuente de energía, en este caso una estación de trabajo la cual consta de un mueble, una computadora, una papelerera, un teléfono una silla y demás ítems usualmente presentes en una ocupación de oficina, todos son mostrados en la Figura 18.



*Figura 18. Estación de trabajo fuente de energía para el análisis
(Los Autores, 2018)*

La segunda etapa consistió en encontrar una curva que se semejara al incendio de diseño seleccionado en términos de materiales de combustión y dimensiones, por lo tanto resultó necesario ajustar el modelo y el HRR de acuerdo con el experimento 101 practicado por el Departamento Nacional de Estándares (1988) (NBS por su siglas en inglés) en su publicación de ensayos en estaciones de trabajo para encontrar curvas de

incendio (*Quick response sprinklers in office configurations: Fire test results*), el cual constó en los siguientes ítems:

- Un escritorio construido de madera contrachapada con espesor de 16 mm (5/8”).
- Las dimensiones fueron: 1,52 m de altura, 1,24 m de ancho y entre 0,24 m a 0,6 m de fondo.
- El peso del mismo fue de 58,1 kg (128 lb).
- Fue cargado con 44,9 kg de papel de oficina.
- Una papelerera de construida de madera contrachapada con espesor de 16 mm (5/8”).
- Las dimensiones fueron: 1,83 m de altura, 0,91 m de ancho y entre 0,30 m de fondo.
- El peso del mismo fue de 46.3 kg (102 lb).
- Fue cargado con 72.6 kg de papel de oficina.

Producto de esta decisión se adoptó el comportamiento de la curva del incendio prueba 101 descrito por la Figura 19. En ella se puede observar que el HRR máximo fue de alrededor de 1440 kW a un tiempo de 1100 s (18 min), y en comparación con las curvas de crecimiento en su etapa incipiente se asemejo al comportamiento de un incendio medio.

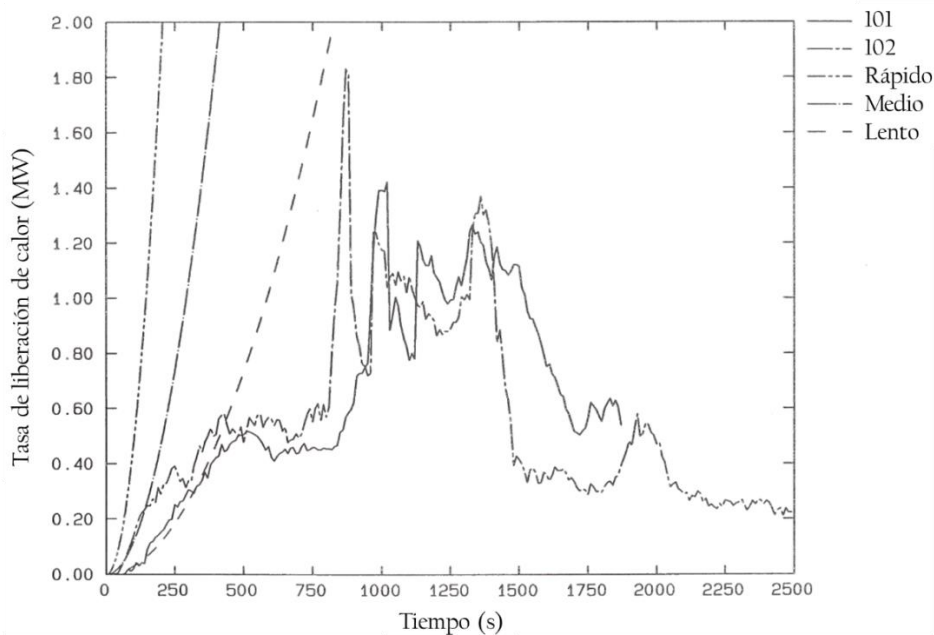


Figura 19. Ensayos en estaciones de trabajo, pruebas 101 y 102 (NBS, 1988)

Una vez que se modeló y parametrizó el HRR el siguiente paso dentro de la etapa de modelado fue realizar la simulación.

3.6.4. Ajustes de modelado

Como parte del modelado la iteración fue un factor clave. En este caso es necesario mencionar que a las áreas supuestas, no se les tuvo que practicar ningún cambio sustancial por lo que los retrasos fueron minimizados, según la parte estructural.

Además de la parte estructural facilitada en gran parte por la interfaz PyroSim®, una ventaja de la utilización de programas informáticos de simulación de fluidos es que permite vincular los diferentes sistemas instalados en el edificio, permitiendo la inclusión de dispositivos tales como sensores, detectores de humo y de calor.

La finalidad de colocar sensores radica en que son dispositivos que no interfieren con el desarrollo del incendio, solo toman mediciones por lo tanto no tuvieron una pérdida de tiempo por calentamiento a diferencia de los detectores de humo y de calor.

Los principales dispositivos colocados son listados en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Dispositivos seleccionados para la simulación (Los Autores, 2018)

Dispositivo	Función	Criterio	Altura
Detector de humo	Inicializa el tiempo de alarma, basado en el retraso indicado en NFPA 72.	10 s después de recibida la señal de humo	2,25 m.s.n.p.t
Detector de calor	Indica el tiempo en el cual la temperatura logra activar un rociador.	Seleccionado y colocado según NFPA 13. Temperatura de activación 68° C.	2,25 m.s.n.p.t
Sensores de temperatura	Monitorean los diferentes tiempos en los cuales se alcanzan daños por quemaduras en el tracto respiratorio	Hipertermia Quemaduras en el tracto respiratorio	1,50
			m.s.n.p.t
			1,70
			m.s.n.p.t
Sensores de visibilidad	Monitorean los diferentes tiempos en los cuales se alcanzan condiciones insostenibles para la visibilidad, según NFPA 101y SFPE.	Rango de visibilidad: 4,0 m ocupantes familiarizados, 13,0 m ocupantes no familiarizados	1,50
			m.s.n.p.t
			1,70
			m.s.n.p.t
			1,83
			m.s.n.p.t

Los dispositivos mostraron sus resultados en formato de datos de valores numéricos lo cual permitió graficar los resultados de acuerdo a la necesidad de análisis.

3.6.5. Corrida de simulación

Para esta parte, se ajustó el tiempo de modelado en función de la entrega de calor del combustible según la curva de la Figura 19 y se dividió en instantes de entre 250 s

y 125 s para los momentos donde la fracción de entrega de calor se acercó a 1,0; valor máximo de la simulación.

En la Figura 20 se muestran los valores tomados para realizar la corrida del incendio en tiempo real esperado. Se aprecia un detalle importante de mencionar y fue que se debió ajustar el valor de la tasa de liberación de calor por unidad de área (HRRPUA por sus siglas en inglés) ya que las dimensiones de la estación de trabajo encontrada en el edificio diferían con respecto de las aportadas por el test del NIST, con lo cual el nuevo valor de HRRPUA fue de 1280 kW y no de 1440 kW reduciendo en 12% el valor original.

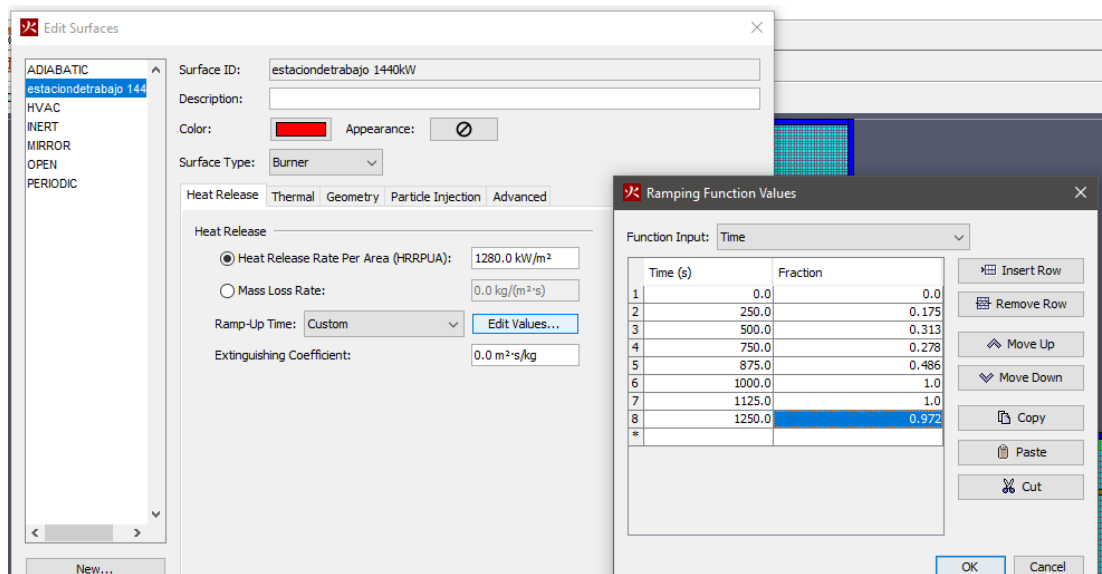


Figura 20. Ajuste de HRR para segunda simulación (Los Autores, 2018)

Luego de realizado lo anterior se generó la simulación y se entregaron los resultados de ASET requeridos por el método de análisis.

3.7. Desarrollo del modelo de evacuación para el edificio.

Paralelo al desarrollo del modelado de incendios, se modeló el proceso de evacuación en *Pathfinder*®. Para esto fue necesario definir la ocupación, características de los ocupantes, características del edificio y el escenario de evacuación. El modelado se desarrolló según sigue:

3.7.1. Definición de la ocupación

Utilizando los planos del edificio se definió la cantidad de ocupantes totales bajo la suposición de que se contará a su máxima capacidad. La cantidad de personas por habitación se detalló mediante el conteo manual de los asientos dispuestos en el diseño arquitectónico. La cantidad utilizada para el ingreso de los ocupantes se detalla en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Cantidad de ocupantes por nivel (Los Autores, 2018)

Nivel	Total	Mujer		Hombre	
		Administrativo	Estudiante	Administrativo	Estudiante
1 Facultad de Ingeniería	288	24	59	22	183
2 Ingeniería Mecánica	341	11	29	37	264
3 Ingeniería Civil	339	19	78	35	207
4 Ingeniería Química	382	22	147	32	181
Ingeniería					
5 Biosistemas /Topográfica	285	25	43	31	187
6 Ingeniería Industrial	231	57	38	73	63
Total	1866	158	394	230	1085

La cantidad respectiva de administrativos y estudiantes se determinó mediante la suposición de que en cada escritorio se encuentra un ocupante administrativo atendiendo a ocupantes estudiantiles. La distribución detallada de ocupantes se encuentra en el Anexo B.

La proporción de mujeres y hombres se calculó basándose en datos existentes, extraídos de las páginas web de cada Escuela y de la Facultad de Ingeniería. En estas páginas se logró encontrar el personal femenino y masculino que trabaja en la dirección, en puestos administrativos y como profesores o profesoras. Para cada Escuela y Facultad se realizó el conteo total del personal administrativo y profesorado de forma separada y se calculó el porcentaje femenino y masculino. Los porcentajes

para personal administrativo se encuentran en las Cuadro 12, mientras que el Cuadro 13 compila datos del profesorado.

*Cuadro 12. Distribución de personal administrativo según predominio de género
(Los Autores, 2018)*

Departamento	Mujeres	Hombres
Ingeniería Mecánica	19,4%	80,6%
Ingeniería Eléctrica	9,9%	90,1%
Ingeniería Topográfica	25,7%	74,3%
Ingeniería Agrícola	37,9%	62,1%
Ingeniería Civil	35,3%	64,7%
Ingeniería Industrial	39,5%	60,5%
Ingeniería Química	44,4%	55,6%
Decanato Ingeniería	76,5%	23,5%
CASE	100%	0%
CEDI	100%	0%
Promedio	48,9%	51,1%

*Cuadro 13. Distribución de profesorado según predominio de género
(Los Autores, 2018)*

Escuela	Mujeres	Hombres
Ingeniería Mecánica	16,7%	83,3%
Ingeniería Topográfica	22,6%	77,4%
Ingeniería Agrícola	26,1%	73,9%
Ingeniería Civil	16,7%	83,3%
Ingeniería Industrial	27,6%	72,4%
Ingeniería Química	42,9%	57,1%
Promedio	25,4%	74,6%

El dato de la proporción de estudiantes hombres y mujeres se obtuvo de información extraída del Programa Estado de la Nación (ver Anexo C). El

Cuadro 14 detalla la distribución de la matrícula estudiantil, dividida por género, según cada carrera.

Cuadro 14. Distribución de la matrícula por carreras en la UCR según predominio de género. (Los Autores, 2018)

Carrera	Mujeres	Hombres
Ingeniería Mecánica	9,8%	90,2%
Ingeniería Civil	26,9%	73,1%
Ingeniería Química	44,8%	55,2%
Ingeniería Agrícola (Biosistemas)	23,4%	76,6%
Ingeniería Topográfica	13,7%	86,3%
Ingeniería Industrial	37,0%	63,0%
Promedio	24,2%	75,8%

3.7.2. Escenarios de comportamiento y pre-tiempos de evacuación

Tomando como referencia la norma ISO 16738:2009 de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés), se seleccionó la categoría para el recinto que contiene el conato, el Decanato de Ingeniería y la categoría para todos los demás espacios del edificio.

El Cuadro 15 indica la categoría que se consideró cada ocupación.

Cuadro 15. Escenarios de comportamiento y tipos de ocupación. (Los Autores, 2018)

Categoría	Estado de alerta del ocupante	Familiaridad del ocupante	Densidad de ocupantes	Encierros / Complejidad	Ocupación
A	Despierto	Familiar	Bajo	Uno o muchos	Decanato de Ingeniería en Nivel 1
B1	Despierto	No familiar	Alto	Uno o pocos	Niveles del 1 al 6, excluyendo Decanato de Ingeniería

Para la ocupación Decanato de Ingeniería se seleccionó la categoría A (despierto y familiar) debido a que la mayoría de personas que se encuentran en esa habitación son colaboradores administrativos de la UCR que pasan gran cantidad de horas en el edificio, por lo que se supuso que llegan a conocer bien la distribución interna de este.

Todas las habitaciones restantes del edificio, desde el Nivel 1 al Nivel 6, se consideraron categoría B1 (despierto y no familiar) ya que las personas que ocupan los espacios normalmente corresponde a estudiantes y profesores, que visitan las instalaciones de manera menos concurrida que los colaboradores administrativos. Se definió por lo tanto que su conocimiento acerca de la distribución interna del edificio no es basto, lo que lleva a afectar el sentido de orientación de los agentes y por ende el tiempo que tardan en evacuar. Lo descrito se visualiza en el Cuadro 16.

En el Anexo D se puede ver un cuadro extraído de la ISO 16738:2009 donde se detalla cada uno de los modificadores.

Cuadro 16. Escenarios de comportamiento según ISO 16738:2009

(Los Autores, 2018)

Comportamiento	Agente	Categoría	Modificador
Conato (1er Nivel)	Estudiante/Administrativo	A	M2 B2 A1
1er Nivel	Estudiante/Administrativo	B1	M2 B2 A1
2do Nivel	Estudiante/Administrativo	B1	M2 B2 A1
3er Nivel	Estudiante/Administrativo	B1	M2 B2 A1
4to Nivel	Estudiante/Administrativo	B1	M2 B2 A1
5to Nivel	Estudiante/Administrativo	B1	M2 B2 A1
6to Nivel	Estudiante/Administrativo	B1	M2 B2 A1
Discapacidad	Discapacitado/Discapacitada	B1	M2 B2 A1

Relacionado a la categoría y los modificadores, se obtuvieron los tiempos de pre-evacuación mostrados en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Tiempos de pre-evacuación en segundos según ISO 16738:2009

(Los Autores, 2018)

Categoría	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
A	60	180	120	20
B1	90	270	180	30

3.7.3. Velocidades de desplazamiento

Para conocer las velocidades de los agentes se tomó como referencia la normativa MSC.1/Circ.1238:2007 de la Organización Marítima Internacional (IMO por sus siglas en inglés). Esta registra velocidades para personas según sexo, edad y condiciones de movilidad.

Se supuso que la gran mayoría de estudiantes de la facultad de ingeniería se encuentran dentro del rango de los 17 a 30 años de edad, mientras que los profesores y

administrativos tienen, en su mayoría, entre 31 y 50 años de edad. Debido a falta de información sobre población discapacitada, se consideró que estos fueran estudiantes. Las velocidades de cada población se detallan en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Resumen de velocidades según sexo y edad (Los Autores, 2018)

Población	Velocidad (m/s)			
	Administrativo		Estudiantes	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Mujeres 17 - 30	-	-	0,93	1,55
Hombres 17 - 30	-	-	1,11	1,85
Mujeres 31 - 50	0,71	1,19	-	-
Hombres 31 - 50	0,97	1,62	-	-
Mujer Discapacitada	-	-	0,37	0,61
Hombre Discapacitado	-	-	0,55	0,91

El desplazamiento de los ocupantes en las escaleras se definió con las medidas de la huella y contrahuella de la escalera. El valor del modificador de velocidad k se encuentra en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Máximas velocidades de desplazamiento y velocidades de flujo sin obstáculos para desplazamientos horizontales y de escaleras (ISO, 2009)

Elemento de ruta de salida		k	Velocidad de desplazamiento (m/s)	Flujo máximo específico F_{Smax} (personas/m/s de ancho efectivo)
Corredor, pasillo, rampa, puertas		1,40	1,19	1,19
Huella de escalera (mm)	ContraHuella de escalera (mm)	-	-	-
178	279	1,08	0,95	1,01

3.7.4. Parametrización del modelado

La parametrización de los datos se realizó considerando lo siguiente:

- La velocidad se modela como una distribución normal.
- El tiempo de pre-evacuación se modela como una distribución logarítmica normal.
- Todas las salidas están habilitadas.
- Los ocupantes evacuan a la salida más próxima.
- La ocupación máxima del edificio es de 1872 personas.
- Por cada piso se ingresó un ocupante en silla de ruedas, el cual es asistido por otro ocupante para proceder con la evacuación. En total se agregaron 6 ocupantes con esta característica.
- Los ocupantes en silla de ruedas evacuan el edificio por las escaleras con ayuda de otro ocupante.

3.7.5. Corrida del modelado de evacuación

Como parte del proceso de modelado, se realizaron varias corridas de prueba con las cuales se pudiera comprobar que el comportamiento de los agentes, según los datos

ingresados, fuera congruente con un comportamiento humano esperado. Se encontraron fallos como la selección de todos los agentes por un único medio de egreso a pesar de que otros estuvieran descongestionados. Se ajustaron parámetros de comportamiento y se logró un modelo aceptable para realizar iteraciones.

Seleccionado el modelo se realizaron 20 simulaciones del mismo escenario. Esta cantidad se definió según conveniencia de los autores, ya que ninguna normativa o investigación define una cantidad mínima de iteraciones para obtener valores aceptables. En cada una de estas simulaciones lo que se ve variado de manera aleatoria son los tiempos de respuesta y velocidad de cada agente según la distribución de datos seleccionada.

En la Figura 21 se puede ver el modelo con el que se corrieron las 20 simulaciones. Los cilindros de colores en cada piso representan los agentes (ocupantes).

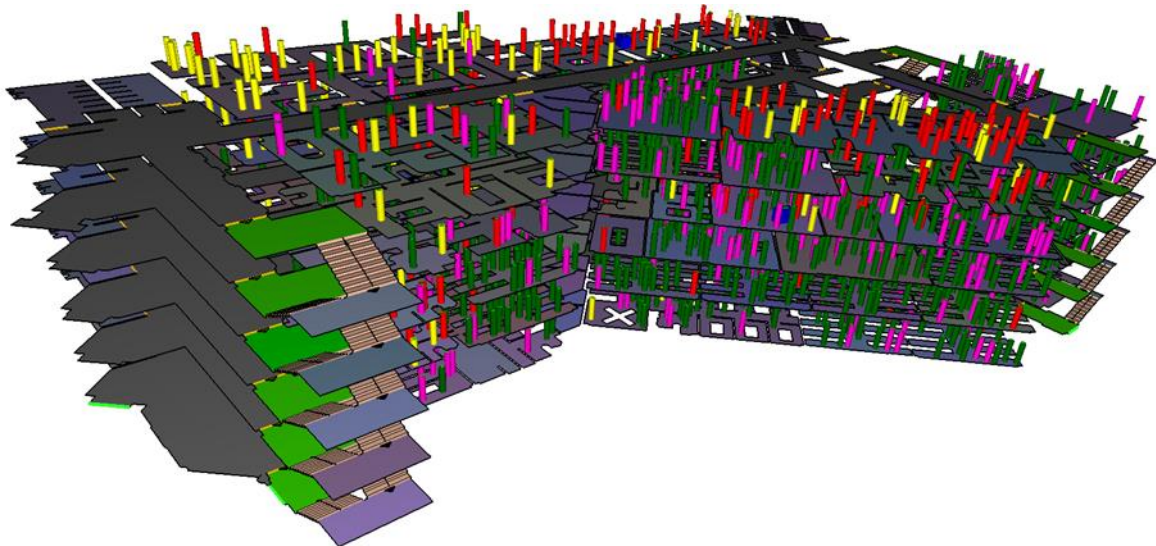


Figura 21. Modelo de evacuación definitivo para simulaciones en Pathfinder®

(Los Autores, 2018)

La carga de ocupantes y su distribución en el área de conato logran visualizarse en la Figura 22.

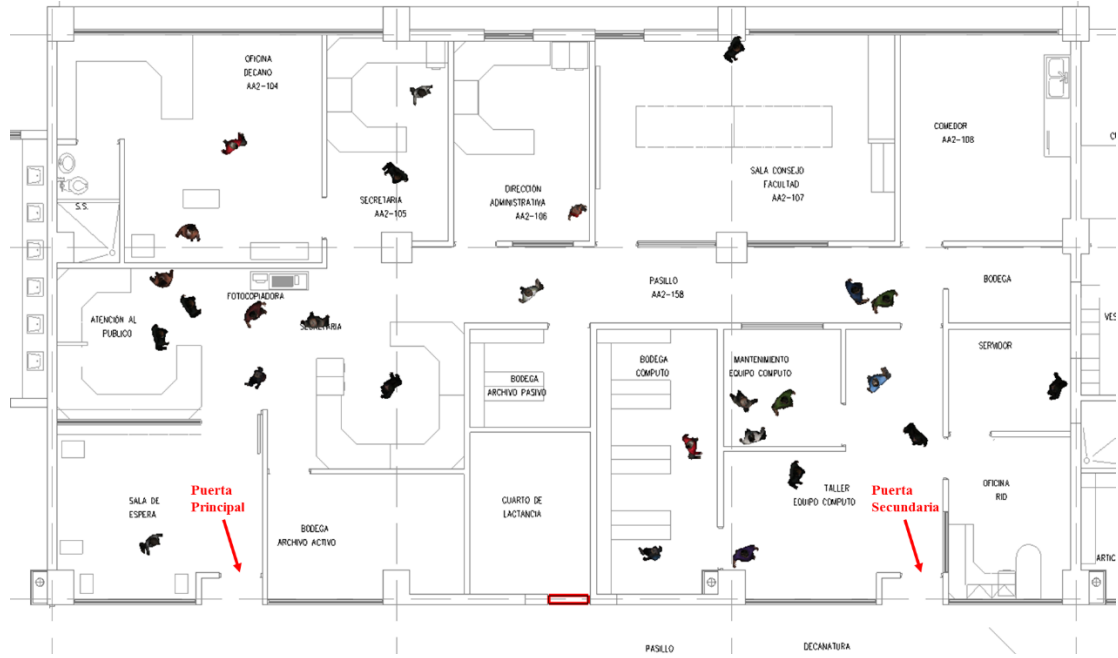


Figura 22. Distribución de ocupantes y puertas en el área de conato.

(Los Autores, 2018)

4. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados y análisis efectuados para llegar a la conclusión del análisis por desempeño del edificio administrativo de la Facultad de Ingeniería de la UCR.

4.1. Resultados ASET

Los siguientes son los resultados de los datos necesarios para cumplir con los criterios de desempeño mencionados en el Capítulo 3.5.

4.1.1. Visibilidad

Las siguientes ilustraciones muestran el comportamiento de los sensores colocados en las diferentes áreas del edificio en función del tiempo.

La Figura 23 muestra los resultados del comportamiento de la visibilidad medida en metros en función de tiempo transcurrido en el incendio para los sensores colocados en la puerta principal y la secundaria del área de conato.

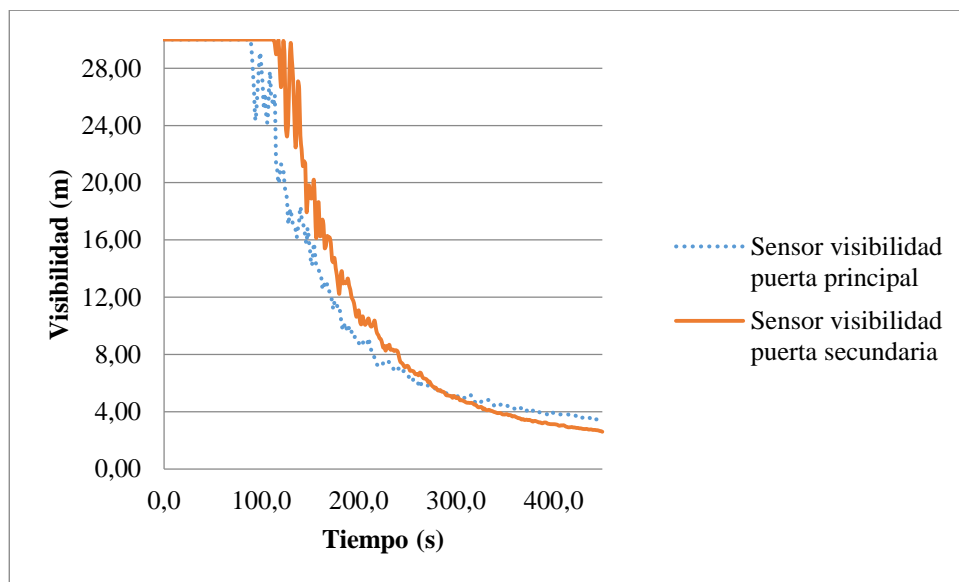


Figura 23. Comportamiento de la visibilidad en las puertas del conato
(Los Autores, 2018).

Los resultados del tiempo en el que se pierden las condiciones de sostenibilidad son mostrados en el Cuadro 20 presentado a continuación.

Cuadro 20. Resultados ASET puerta principal y secundaria (Los Autores, 2018)

Ocupante	Visibilidad (m)	Puerta principal (s)	Puerta secundaria (s)
No familiarizado	13,0	163,8	187,5
Familiarizado	4,0	383,8	338,8

Las condiciones de sostenibilidad fueron perdidas primero por la puerta principal cuando la distancia fue de 13 m, la cual es válida para los ocupantes sin familiaridad con el edificio, comportamiento que varió notoriamente cuando pasamos a la distancia de 4 m máximo rango de visión para los ocupantes con algún grado de familiaridad en el edificio, ya que las condiciones fueron perdidas primero en la salida secundaria, contrastando con lo esperado, debido a que la puerta principal estuvo mucho más cerca de la fuente de ignición, lo que supondría condiciones intolerables cerca de sus alrededores. Esto se muestra y analiza en la Figura 24 y Figura 25, las cuales muestran en color negro las áreas en las cuales fueron perdidas las condiciones de sostenibilidad (visibilidad 13 m y 4 m) a una altura de 1,83m.

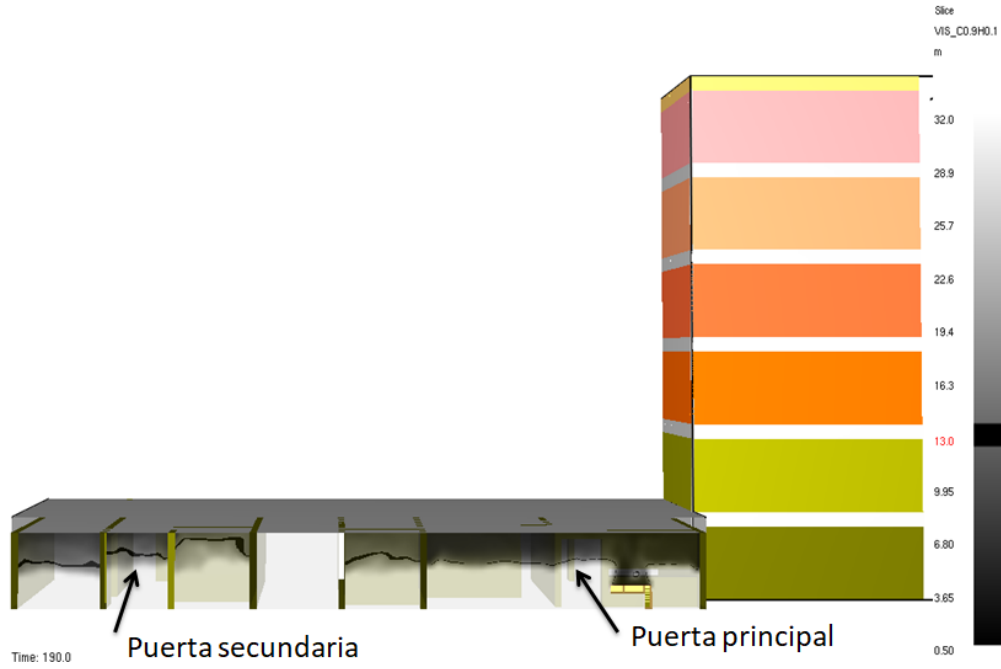


Figura 24. Vista de frente zona de conato corte en función de visibilidad 13 m.
(Los Autores, 2018)

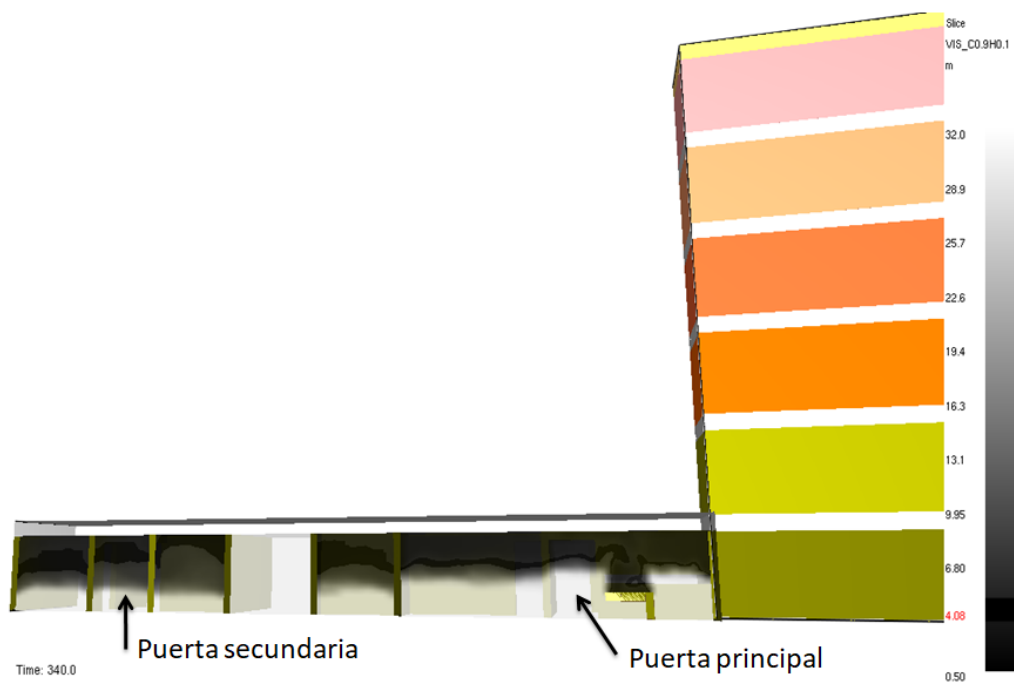


Figura 25. Vista de frente zona de conato corte en función de visibilidad 4 m.
(Los Autores, 2018)

Cuando se compararon los resultados se determinó que el comportamiento de los tiempos de pérdida de condiciones de sostenibilidad fue resultado del flujo de los productos de reacción, ya que los gases tendieron a ocupar el espacio de la parte superior del cielo, se acumularon y descendieron luego de haber llenado toda el área.

Cabe destacar que este efecto no toma tanta relevancia cuando las aéreas son mayores o la altura de la capa de gases no ha descendido sobre el valor recomendado por NFPA.

La Figura 26 muestra las ubicaciones de cada sensor en el área de estudio, en este caso fuera del área de conato. A su vez, la Figura 27 muestra los tiempos en los cuales las condiciones de sostenibilidad son perdidas en las rutas de evacuación hacia la salida principal y secundaria. Como en los resultados anteriores, las alturas corresponden al criterio de NFPA

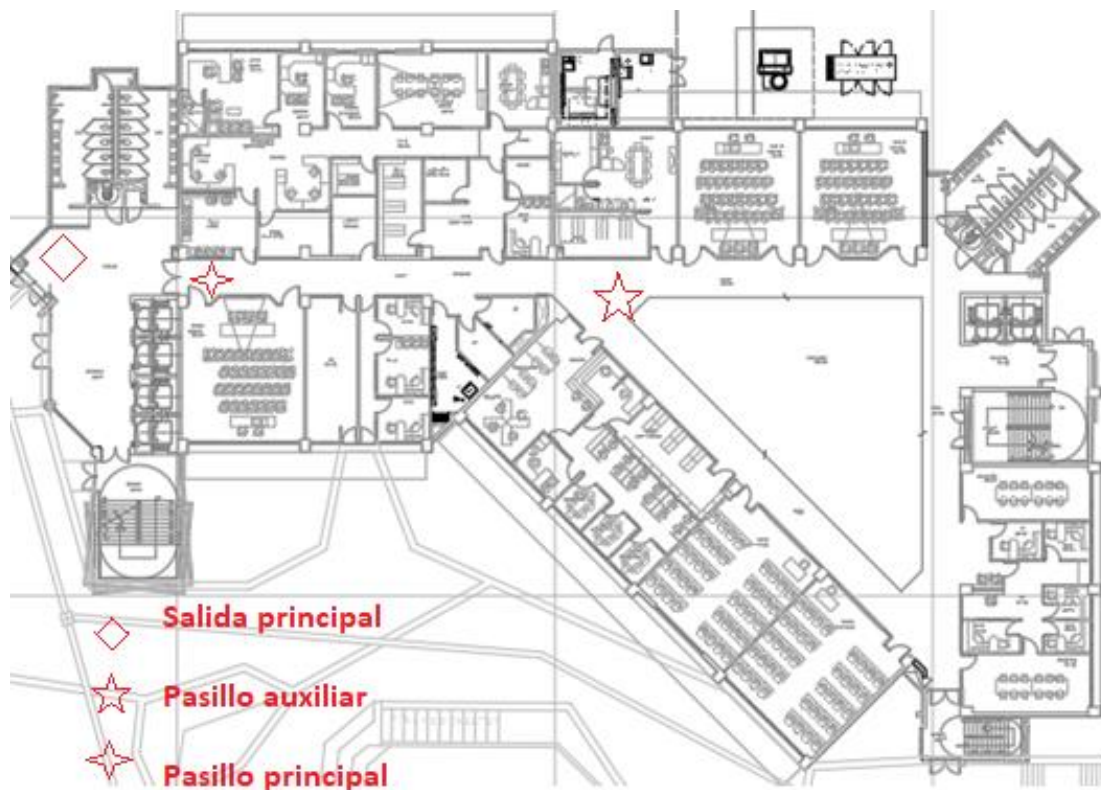


Figura 26. Sensores visibilidad rutas de evacuación (Los Autores, 2018)

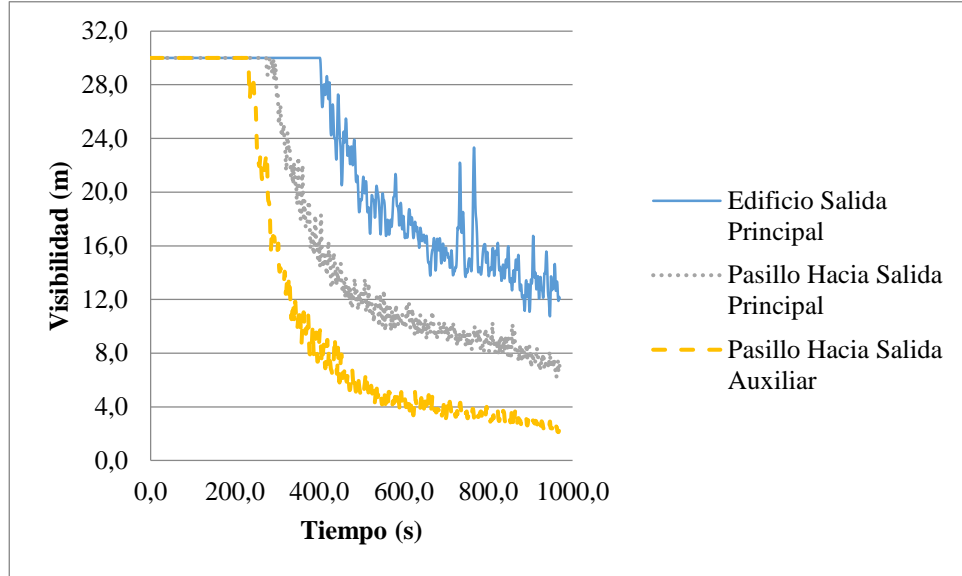


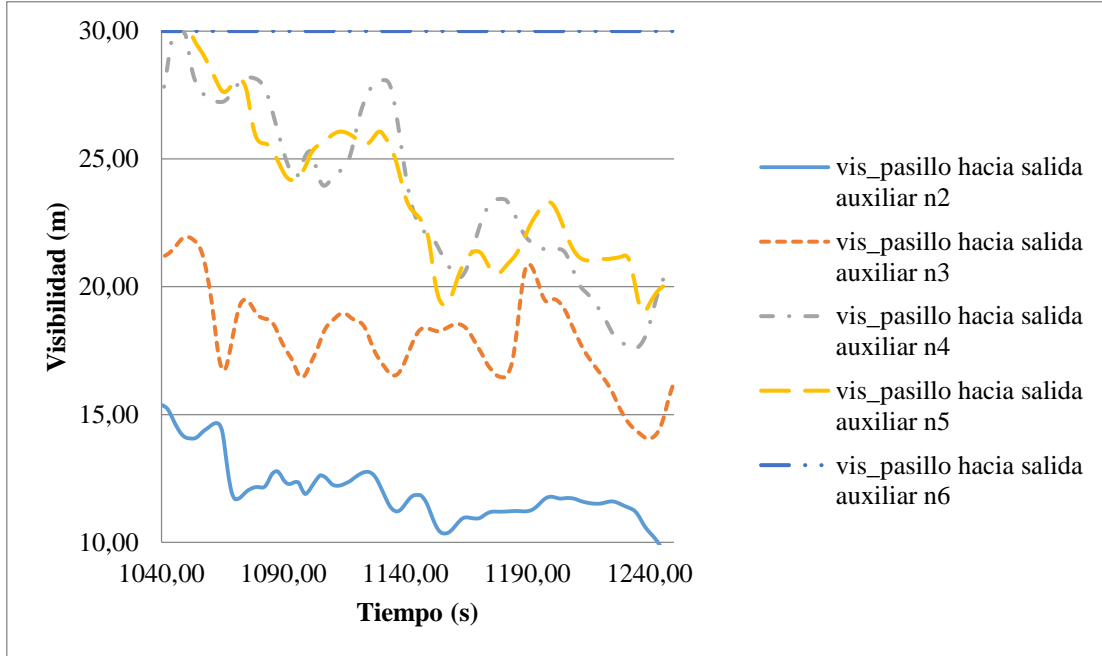
Figura 27. Comportamiento de la visibilidad sensores ubicados en pasillos en función de visibilidad 13 m (Los Autores, 2018)

En las zonas de pasillos los efectos fueron diferentes, esto principalmente a que el área de llenado fue mayor e incluso se contó con áreas abiertas que obligaron a los productos de combustión a subir a los demás niveles del edificio, razón por la cual se pudo observar que el tiempo requerido para que las condiciones de sostenibilidad a diferentes áreas en las zonas de pasillos fueran mayores a la zona de conato.

De los tres puntos analizados el más crítico fue la zona de pasillo auxiliar donde el tiempo en el cual se perdieron las condiciones fue de 322 s (5 min). Para el pasillo principal el tiempo fue de 460 s (7,6 min) y los efectos fueron visibles en la salida principal hasta los 780 s (13 min).

Una vez determinados los tiempos en el área de mayor impacto, lo siguiente fue comprender el comportamiento del humo en los niveles superiores y el tiempo en el cual sus efectos fueron arrastrados.

La Figura 28 muestra la visibilidad en el pasillo auxiliar de los niveles restantes, el sensor fue colocado según el criterio de NFPA (1,83m).



*Figura 28. Sensores de visibilidad pasillo auxiliar niveles superiores 13 m
(Los Autores, 2018)*

La Figura 29 muestra el tiempo al cual se alcanzó el criterio de visibilidad de 1,83 m en los sensores de visibilidad ubicados en el pasillo principal.

Como se aprecia en la línea punteada, el segundo nivel es donde la visibilidad fue marcadamente limitada, el tiempo resultante fue de 1055 s (17,3 min) esto para el pasillo auxiliar y 1035 s (17,25 min) en el pasillo principal.

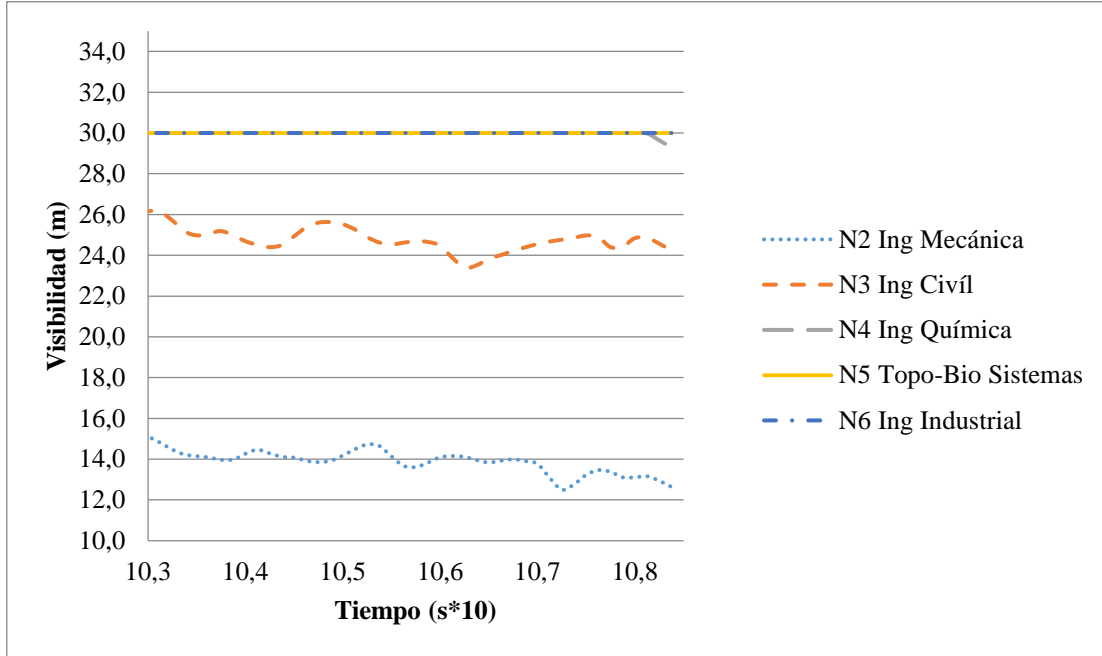


Figura 29. Sensores de visibilidad niveles superiores 13 m (Los Autores, 2018)

Las rutas de evacuación de los restantes niveles ni siquiera se ven afectadas por este efecto luego de transcurrido el tiempo de simulación, razón por la cual algunas de sus líneas no se observan en la gráfica.

La Figura 30 describe el comportamiento de los sensores colocados en las diferentes áreas del edificio en función del tiempo. Los mismos fueron colocados en zonas estratégicas a una altura de 1,83 m desde el nivel de piso terminado.

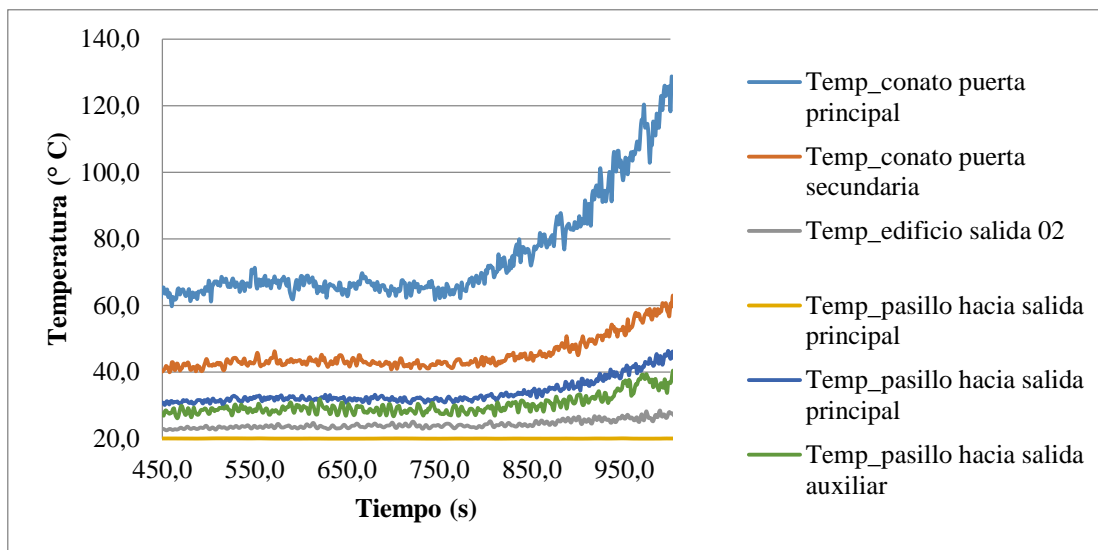


Figura 30. Resultado de sensores de temperatura en diferentes áreas
(Los Autores, 2018)

Se puede apreciar que el tiempo para que se alcancen a perder las condiciones de sostenibilidad es sumamente mayor al requerido para perder las condiciones en caso de visibilidad. El Cuadro 21 compara los tiempos establecidos por los criterios de desempeño y los tiempos obtenidos en el sensor de la puerta principal del conato.

Cuadro 21. Resumen de condiciones de sostenibilidad para puerta principal de conato (Los Autores, 2018)

Criterio de desempeño	Tiempo de resistencia	Condiciones de simulación	Tiempo al que se alcanza
60° C @ 100% hr	≤ 1800 s	60° C @ 25% hr	450 s
120° C @ 10% hr	≤ 600 s	120° C @ 25% hr	990 s

4.2. Resultados de los dispositivos

A continuación muestran el comportamiento de los dispositivos colocados en las diferentes áreas del edificio en función del tiempo y cuyos efectos son interés para el análisis.

La Figura 31, es el resultado del HRR liberado por la estación de trabajo, sin embargo no se consideraron los efectos de enfriamiento luego de haber alcanzado la tasa máxima (“post-flashover”), por lo tanto la gráfica conserva una línea constante a partir del instante 1000 s de 1250 s simulados ya que pudieron contrastarse los efectos que representan un rociador automático.

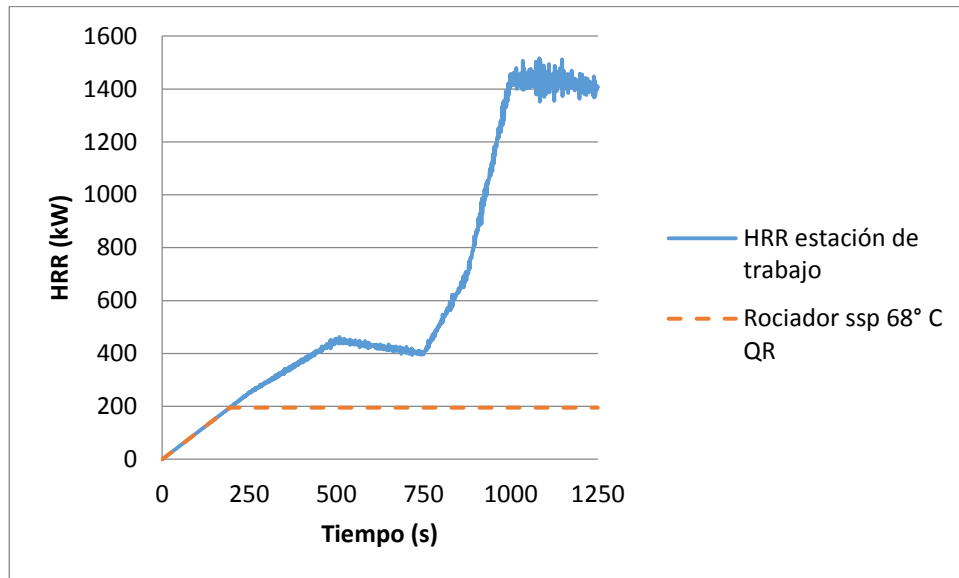


Figura 31. Efectos del rociador sobre la curva de incendio simulada (los autores, 2019)

Al rociador simulado le tomó activarse un tiempo de 195 s (3,5 min), por lo tanto su efecto fue enfriar el incendio y con esto limitar la tasa de liberación de calor a partir de ese momento.

Con estos datos se pasó al análisis de los tiempos para la evacuación.

4.3. Resultados RSET

Los resultados de las 20 simulaciones realizadas se encuentran en el Cuadro 22. Los datos compilados corresponden únicamente al flujo de personas en el conato.

Cuadro 22. Flujo de personas en el conato (Los Autores, 2018)

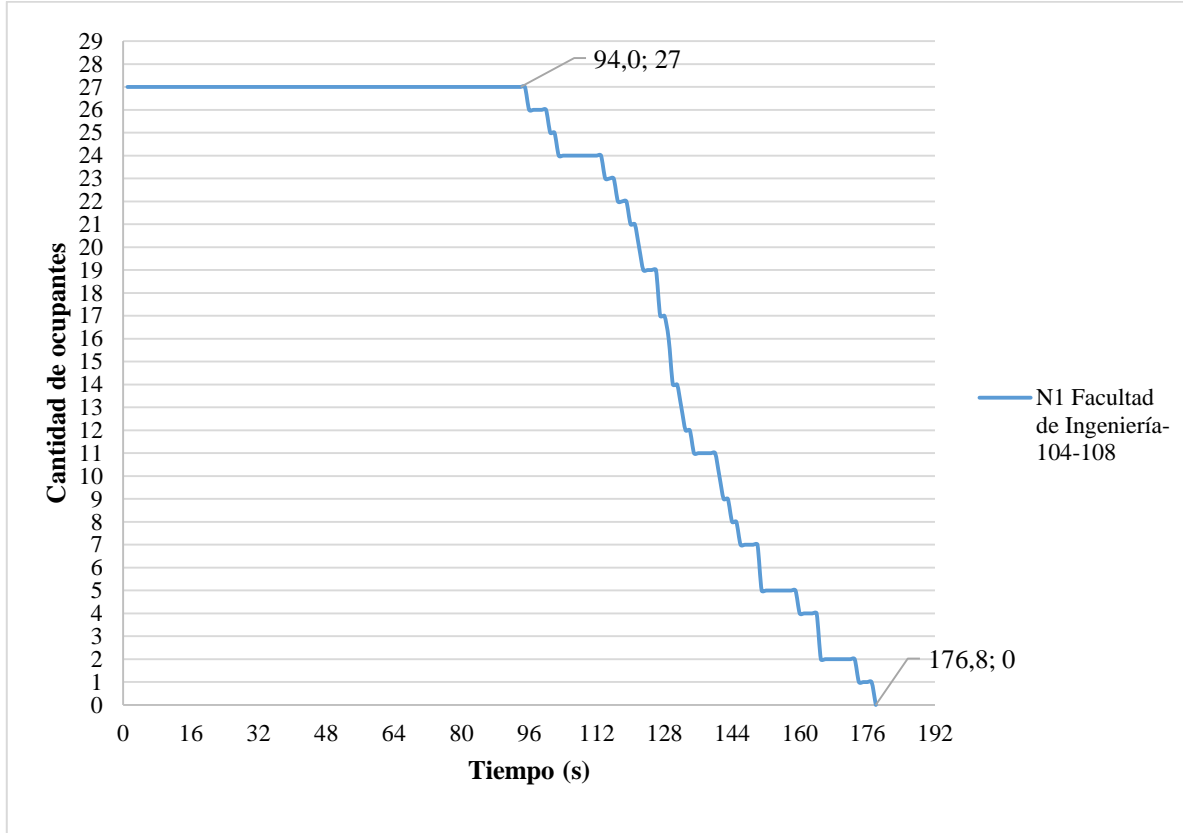
Simulación	Puerta principal		Puerta Secundaria	
	Último en salir (s)	Uso total	Último en salir (s)	Uso total
1	167	17	146,6	10
2	172,5	17	150	10
3	183	17	154,1	10
4	172,1	17	176,8	10
5	166,5	17	158	10
6	172,5	17	173,7	10
7	152,4	17	176,6	10
8	175,9	17	160,2	10
9	162,7	17	168,2	10
10	155,6	17	140,4	10
11	163,7	17	176,5	10
12	163,5	17	140,4	10
13	179,2	17	153,8	10
14	165,8	17	149,6	10
15	146,6	17	183,5	10
16	161,9	17	156,9	10
17	185,8	17	184,3	10
18	153,9	17	142	10
19	171,3	17	145,2	10
20	150,4	17	152,3	10
Promedio	166,1	17	159,5	10
Percentil 95	183,1	17	183,5	10
Min	146,6	17	140,4	10
Max	185,8	17	184,3	10

El percentil 95 del tiempo del último agente en salir por la puerta principal y puerta secundaria del decanato de ingeniería se encuentra en el Cuadro 23. Este dato obtenido corresponde al RSET del análisis, el cual debe ser comparado con el ASET.

*Cuadro 23. Resumen de tiempos de egreso seguros requeridos RSET
(Los Autores, 2018)*

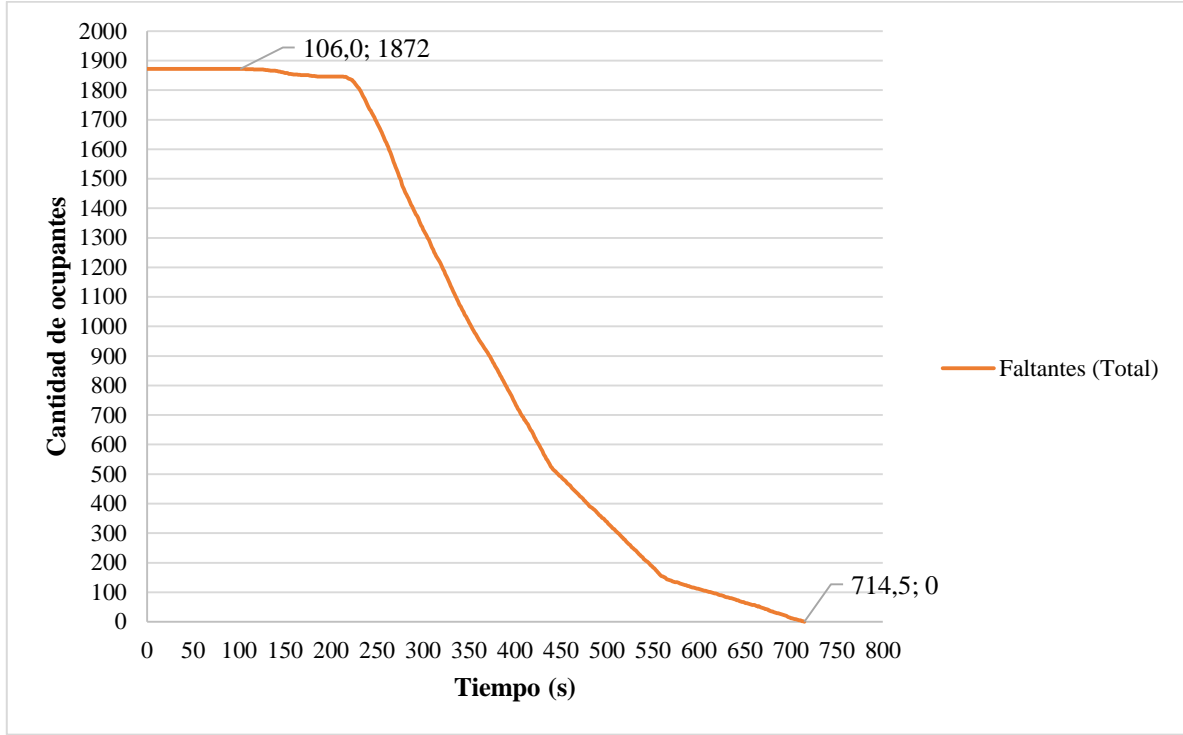
Ocupante	Visibilidad (m)	Puerta principal (s)	Puerta secundaria (s)
Familiarizado	4,0	183,1	183,5

El proceso de evacuación del escenario de conato se logra visualizar en la Figura 32. Los datos graficados corresponden a la simulación 4, de las 20 totales. En ella se puede apreciar el tiempo de espera de pre- evacuación de los 27 ocupantes durante 94 s; luego de este punto todos los agentes empezaron a salir, hasta completar la evacuación total del recinto a los 176,8 s.



*Figura 32. Proceso de evacuación del escenario de conato, simulación 4
(Los Autores, 2018)*

Ahora, el proceso de evacuación general del edificio se comportó según detalla la Figura 33. Para esta simulación en específico se registró la salida del primer agente a los 106 s, mientras que el proceso finalizó con la salida del último agente a los 714,5 s. Nuevamente, los datos graficados corresponden a la simulación 4.



*Figura 33. Proceso de evacuación general del edificio, simulación 4
(Los Autores, 2018)*

Además de los datos del conato, se logró obtener el rendimiento del edificio por nivel. En el Cuadro 24 se puede observar el tiempo en segundos que tardan los ocupantes de cada nivel en evacuar totalmente el edificio.

Cuadro 24. Tiempos de finalización por nivel en segundos. (Los Autores, 2018)

Simulación	1er Nivel	2do Nivel	3er Nivel	4to Nivel	5to Nivel	6to Nivel
1	344,5	392,3	500,8	639,9	683,6	748,9
2	336,5	385,1	488,6	596,4	668,0	731,3
3	350,7	399,2	505,5	592,9	682,7	737,3
4	326,9	366,0	468,1	581,6	661,4	714,3
5	317,7	378,7	469,4	565,6	661,7	709,9
6	386,0	446,5	527,4	782,5	727,1	770,7
7	375,5	414,9	515,3	618,1	693,1	753,3
8	364,4	414,7	502,9	616,3	700,5	758,2
9	337,8	394,8	497,3	615,1	700,2	752,1
10	353,4	384,2	500,8	620,7	682,6	738,9
11	383,8	410,5	511,4	625,2	689,7	757,2
12	328,8	381,6	471,0	620,5	677,3	728,6
13	332,9	365,0	444,0	556,8	649,0	699,5
14	332,0	376,5	476,0	680,5	651,5	714,1
15	407,6	415,3	526,5	625,5	707,7	761,2
16	397,1	418,2	521,6	610,9	695,1	758,1
17	338,4	373,1	460,3	633,6	666,5	715,5
18	310,7	360,7	448,7	556,5	658,7	700,9
19	342,3	377,1	498,3	605,2	691,2	736,4
20	328,4	362,2	445,6	562,0	655,5	716,6
Promedio	349,8	390,8	489,0	615,3	680,2	735,2
Percentil 95	397,6	419,6	526,5	685,6	708,7	761,7

Se obtuvo, por lo tanto, que entre superior sea el nivel donde se encuentren los ocupantes, el tiempo de evacuación aumenta. Lo anterior es coherente debido a que la cantidad de ocupantes por piso es similar, lo que no genera efecto de congestión puntual

en los medios de egreso de un piso en específico. El percentil 95 del Nivel 6 del edificio es el que define al fin de cuentas el tiempo que tarda el último ocupante en evacuar el edificio. Este dato está basado en el análisis de 20 simulaciones, así que a mayor cantidad de simulaciones este dato puede aumentar o disminuir.

4.4. Comparación RSET y ASET

De los tiempos RSET y ASET obtenidos se completó el Cuadro 25, donde se logró comparar ambos tiempos y obtener el Margen de Seguridad para cada tipo de ocupante.

Cuadro 25. Comparativo de RSET y ASET (Los Autores, 2018)

Ocupante	Visibilidad (m)	Puerta principal (s)			Puerta secundaria (s)		
		RSET	ASET	Margen de Seguridad	RSET	ASET	Margen de Seguridad
Familiarizado	4,0	183,1	383,8	200,7	183,5	338,8	155,3

Para la puerta principal del conato se obtuvo las condiciones se vuelven insostenibles 200,7 s después de que el último agente evacua el Decanato de Ingeniería (183,1 s). Este margen de seguridad fue de 109,6%.

Correspondiente a la puerta secundaria, el tiempo de RSET fue de 183,5 s y el ASET de 338,8 s; esto ofrece un margen de seguridad de 155,3 s (84,6%).

4.5. Análisis de resultados

Los resultados presentados en los párrafos anteriores detallaron como fue el comportamiento de las condiciones de sostenibilidad en términos del ASET, tiempo que fue dependiente de tres parámetros: visibilidad, daño térmico y toxicidad, tanto en el área del conato como en áreas aledañas y niveles superiores.

Analizando el parámetro de visibilidad, se obtuvo que en el área del conato la capa de humos descendió hasta los 1,83 m en un tiempo de 338,8 s; mientras en las áreas

fuera del conato, pasillo del primer nivel, este tiempo se alcanzó en 450 s. Este resultado fue más amplio que en los niveles restantes.

Para el daño térmico, el tiempo obtenido para alcanzar la temperatura de 60 °C fue de 450 s en el área de conato, lo cual fue superior al tiempo de pérdida de visibilidad.

Según el criterio de desempeño, el tiempo requerido para que se perdieran las condiciones de sostenibilidad fue superior al tiempo en el cual la capa de humos alcanzó el nivel de 1,83 m. Por esta razón el parámetro de toxicidad no fue tomado en cuenta.

Por lo tanto, basado en lo anterior se determinó como limitante el tiempo de pérdida de condiciones de visibilidad.

Para el análisis del RSET, los tiempos en la zona del conato se dividieron en dos medios de egreso: la puerta principal y la puerta secundaria. Cabe destacar que solo se requirió analizar en esta zona debido a que las condiciones de sostenibilidad crítica se dieron acá. Los niveles restantes del edificio realizaron la evacuación en un tiempo inferior al de pérdida de visibilidad.

El Cuadro 25 demuestra que el medio de egreso crítico fue la puerta secundaria. Los ocupantes del área de conato realizaron la evacuación por esta puerta en un tiempo de 183,5 s. Al comparar este tiempo con el tiempo de pérdida de visibilidad (338,8 s), se encuentra que es menor, lo cual indica que la evacuación de los ocupantes es segura.

Visualizando lo descrito anteriormente mediante una captura de la simulación 4 (ver Figura 34) se encuentra que en el área del conato las condiciones aún no habían alcanzado el punto de insostenibilidad y el último ocupante a los 176,8 s ya había salido del recinto por la puerta secundaria. Las condiciones en las puertas al momento de la salida del último ocupante se acercaban a la escala de amarillo (entre 9,0 y 6,0 m), superior a los 4,0 m definido para ocupantes familiarizados (escala de naranja).

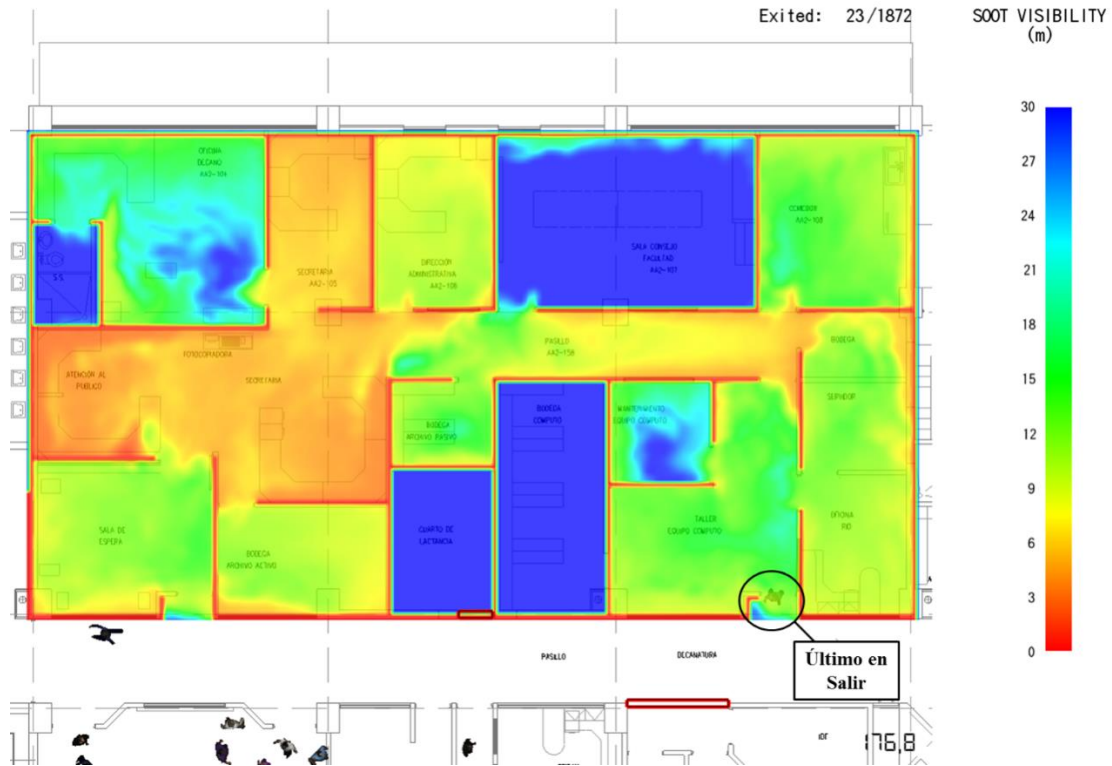


Figura 34. Condiciones de visibilidad en área de conato, simulación 4.
(Los Autores, 2018)

Además se muestran las condiciones de visibilidad que se presentaron en el edificio cuando se inició el proceso de evacuación según el percentil 95 del Cuadro 24.

La Figura 35 muestra las condiciones de visibilidad al momento que sale el primer ocupante del primer piso. La escala de grises de la derecha de las siguientes figuras mide la visibilidad en metros a una altura de 1,83 m; mientras que el cuadro negro de dicha escala marca la línea de visibilidad a los 13 m (criterio de ocupante familiarizado) en donde se pierden las condiciones de sostenibilidad.

Entonces, para los 106 s, tiempo en que sale el primer ocupante, se tiene que las condiciones de sostenibilidad en términos de visibilidad son estables.

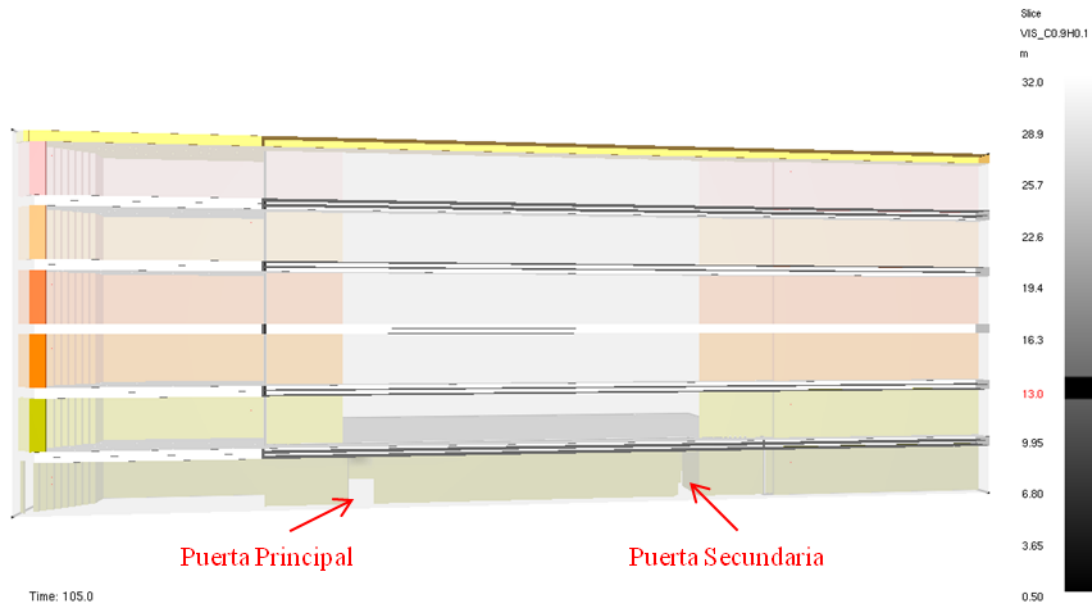


Figura 35. Condiciones de visibilidad al momento que sale el primer ocupante, primer nivel (Los Autores, 2019).

Por su parte, la Figura 36 muestra las condiciones para el momento en que salió el último ocupante del primer nivel (397 s). Acá ya se puede ver que la capa de humo se vuelve considerable, ya que en ciertas zonas el criterio de visibilidad de 13 m está llegando a la altura del sensor.

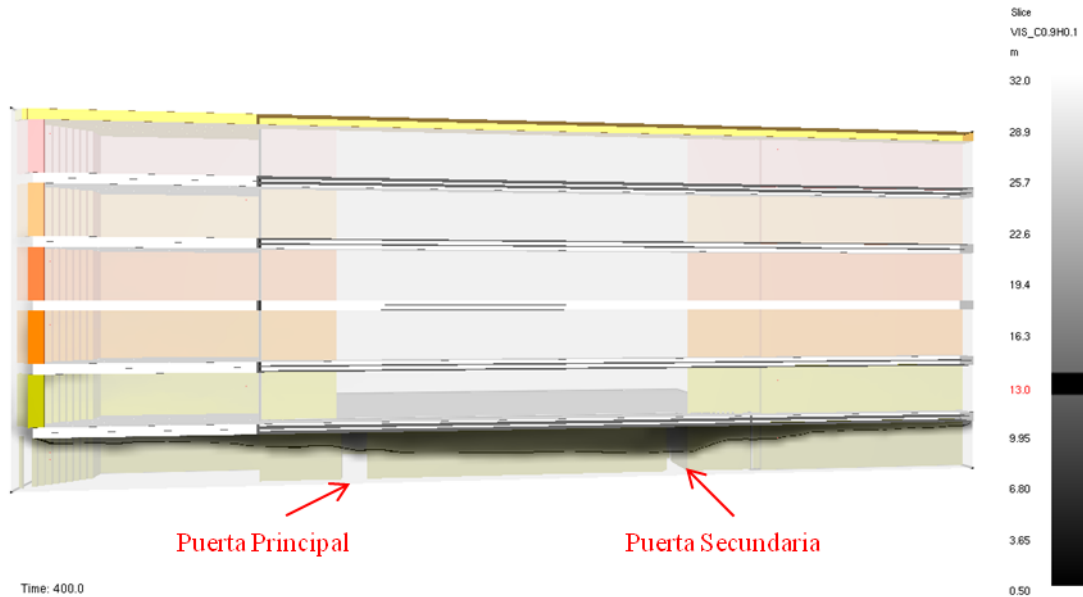


Figura 36. Condiciones de visibilidad al momento que sale el ultimo ocupante, primer nivel (Los Autores, 2019).

La Figura 37 muestra las condiciones al finalizar la evacuación de la totalidad de ocupantes (761 s), se puede apreciar que el efecto de los productos de combustión en el primer nivel se torna drástico, sin embargo, los pisos superiores apenas están siendo afectados en este tiempo.

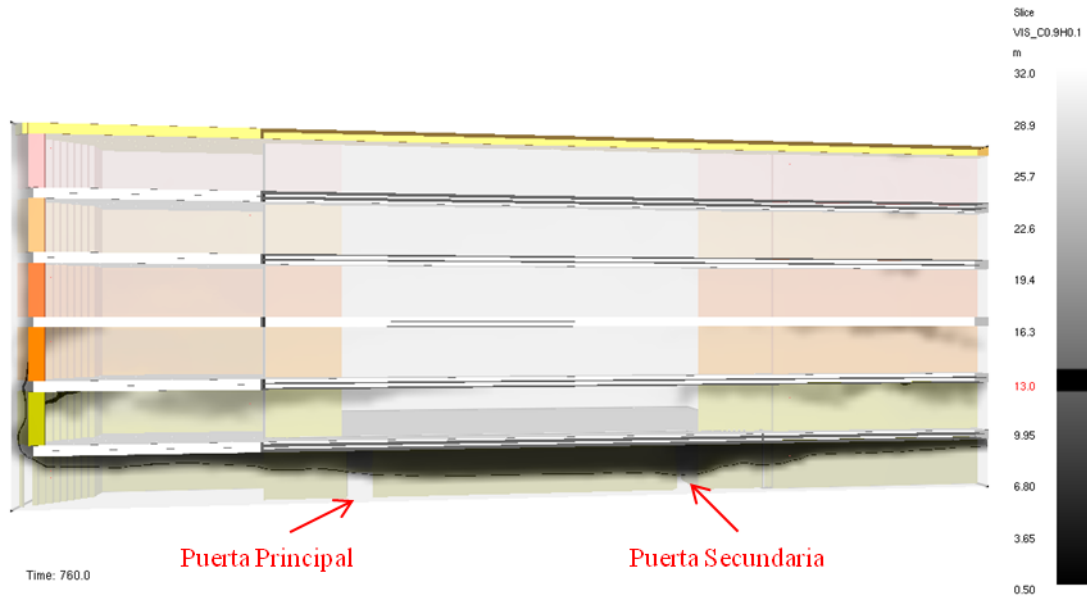


Figura 37. Condiciones de visibilidad al momento que sale el ultimo ocupante, sexto nivel (Los Autores, 2019).

5. Conclusiones

Se determinó mediante el uso del método de análisis de NFPA, análisis del riesgo y de estadísticas de incendios del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica que el punto de ignición más probable y que podría afectar los medios de egreso fue la estación de trabajo de la recepción de la oficina de decanato en el primer nivel del edificio.

Se determinó que las rutas de evacuación en caso de incendio dadas las condiciones supuestas, se comportan de manera aceptable, dado que las personas logran evacuar el edificio en un tiempo de 761,7 s. Este tiempo es menor al tiempo en que se pierden las condiciones de sostenibilidad en el edificio en términos de visibilidad en el primer nivel, el cual ocurre en un tiempo de 780 s después de haber iniciado el incendio. Debido a esto, no se considera necesario sugerir modificaciones a las rutas de evacuación que el edificio actualmente presenta.

Se alcanzó determinar que el efecto de instalar un sistema de supresión de incendios a base de rociadores automáticos, diseñado, instalado y dándole el respectivo mantenimiento basándose en la normativa NFPA aplicable, reduce los daños producidos por la liberación de calor asociada a un incendio. Esto debido a que cuando se alcanza la temperatura de activación, el rociador automático se activa y controla la tasa de liberación de calor (HRR), ayudando a que las condiciones de sostenibilidad se mantengan durante más tiempo, logrando así aumentar el tiempo disponible (ASET) para que los ocupantes evacuen de manera segura, según la simulación de rociador automático realizada

Con el análisis mostrado se determinó que, para las condiciones supuestas, la población relacionada con el incendio (personal administrativo en su mayoría) alcanzó evacuar el área de conato en un tiempo de 183,5 s el cual es menor al tiempo disponible (338,8 s).

Dado que el diseño y construcción del edificio en términos de seguridad humana se basaron en el código prescriptivo, se logró demostrar que los criterios utilizados e

indicados en la norma son aceptables y cumplen con la meta de protección de los ocupantes, esto ante el escenario de incendio descrito y analizado en este trabajo.

El desarrollo de este trabajo dejó al descubierto la carencia de estudios, estadísticas e investigación en la región referente a características y comportamientos de las personas en caso de emergencia. Debido a esto, se debe acudir a material documentado desarrollado en otras regiones donde las características poblaciones y la misma cultura difieren de la costarricense, lo cual agrega una incertidumbre a los resultados del análisis.

La aplicación del método por desempeño no se limita al análisis de edificación, como fue el caso de este trabajo, o para el diseño de nuevas edificaciones, sino que además resulta de gran ayuda para diferentes tipos de estudios como por ejemplo: porciones específicas de edificios con riegos de complejo análisis, ensayos de materiales y reconstrucción de incendios.

La estimación de los factores ASET y RSET es compleja debido a la cantidad de variables que incluye cada uno de sus cálculos, razón por la cual el uso de tecnologías apropiadas para su solución es esencial, ya que si se realizaran de manera clásica el procedimiento resultaría desgastante y ampliamente complejo. Por lo tanto, el acceso y uso de herramientas computacionales abre la posibilidad de desarrollar más y mejores análisis en una cantidad de tiempo menor en comparación con años anteriores.

Con la entrega de este documento y el informe de desempeño, realizados según la guía del SFPE y la NFPA en términos de seguridad humana, se aportó una referencia documentada la cual sirve como ejemplo para estudiantes y profesionales que deseen realizar futuros análisis basados en el método por desempeño en el país.

6. Bibliografía

- Babrauskas, V. (s.f.). *Performance-Based Building Codes: What Will Happen To The Levels Of Safety?* Obtenido de: http://www.frocc.org/pdf/regulation/Babrauskas_on_building_codes.pdf
- Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica. (2013). *Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios*. Versión 2013. Obtenido de: https://www.bomberos.go.cr/wp-content/uploads/2013/06/Manual_de_Disposiciones_Tecnicas_2013.pdf
- Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica. (2018). *Análisis e Investigación de Incendios Al 31 de diciembre 2017*. Obtenido de: <https://www.bomberos.go.cr/wp-content/uploads/2018/01/Investigacio%CC%81n-Estadi%CC%81sticas-31-Dic.-2017.pptx>
- Berrocal, J. (2017). *¿Cuáles leyes rigen el diseño de estructuras contra incendios en Costa Rica?* Obtenido de: <http://revistaconstruir.com/cuales-leyes-rigen-el-diseno-de-estructuras-contra-incendios-en-costa-rica/>
- Brown, T., LeMay, H., Bursten, B. (2004) *Química. La Ciencia Central* (9.^a Ed.). México: Pearson Educación
- Capote, J; Alvear, D; Cuesta, A. (2011). *Designing behavioural scenarios for the evacuation analysis of a Civic Centre*. Obtenido de: https://www.gidai.unican.es/doc/Paper_GIDAI_University_of_Cantabria.pdf
- Çengel, Y. (2007). *Transferencia De Calor Y Masa. Un enfoque práctico*. (3.^a Ed.). México D.F: McGraw Hill
- Çengel, Y. (2007). *Transferencia De Calor Y Masa. Un enfoque práctico*. (3.^a Ed.). México D.F: McGraw Hill

- Çengel, Y., Boles, M. (2009). *Termodinámica*. (6^a Ed.). México D.F: McGraw Hill
- FDNY.(2005). *Firefighting Procedures, Engine Company Operations*. New York City Fire Department.
- IFC (2015). *International Fire Code*. Illinois: International Code Council
- Hall, J. (2011). *Fatal Effects of Fire*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Hurley, M. & Rosenbaum, E. (2015). *Performance-Based Fire Safety Design*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Hurley, M. & Bukowski, R. (s.f.). *Fire Hazard Analysis Techniques*. Obtenido de: https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=900092.
- IMO (2007). *MSC.1/Circ.1238. Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships*. London: International Maritime Organization.
- INTECO. (s.f.). *¿Qué es la normalización?* Obtenido de: https://www.inteco.org/page/inteco.standards_development
- ISO (2009). *ISO/TR 16738. Fire-safety engineering — Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people*. 1st Edition. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (2009). *ISO 23932. Fire safety engineering — General principles*. 1st Edition. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (2006). *ISO/TS 16733. Fire safety engineering — Selection of design fire scenarios and design fires*. 1st Edition. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kuligowski, E; Peacock, R; Hoskins, B. (2010). *Technical Note 1680. A Review of Building Evacuation Models*. 2nd Edition. National Institute Of Standards and Technology.

- Lataille, J. (2003). *Fire Protection Engineering in Building Design*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann
- Lo, S.M., Gao, L.J. & Yuena, K.K. (2007). *The Development of Performance-Based Fire Safety Engineering Design in Hong Kong and Japan*. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Vol. 9 (Number 3), 133-139. Obtenido de http://www.bse.polyu.edu.hk/researchCentre/Fire_Engineering/summary_of_output/journal/IJEPBFC/V9/p133-139.pdf
- Machado, R. (2008). *Prescriptive Codes vs. Performance Based Codes: Which one is the best Fire Safety Code for the Brazilian context?* *Safety Science Monitor*, Vol. 12 (Number 1). Obtenido de: <http://ssmon.chb.kth.se/volumes/vol12/3Tavares.pdf>
- NBS (1988). *Quick Response Sprinklers in Office Configurations: Fire Test Results*. Gaithersburg, Maryland: National Bureau of Standards
- NFPA (2016). *NFPA® 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- NFPA (2016). *NFPA 72® National Fire Alarm and Signaling Code*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- NFPA (2017). *NFPA® 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- NFPA (2017). *Life Safety Code® Handbook*. 14th Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- NFPA (2018). *NFPA 101®: Life Safety Code®*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- NFPA (2018). *NFPA 1®: Fire Code®*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.

- NFPA (2018). *NFPA® 204: Standard for Smoke and Heat Venting*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Nelson, H. (1996). *Performance-Based Fire Safety, Proceedings of the 1996 International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*. Society of Fire Protection Engineers.
- Pérez, M. (2014). *Diseño basado en desempeño*. Obtenido de <http://www.emb.cl/hsec/articulo.mvc?xid=368>
- Pérez, O., Jönsson, J. & Vigne, G. (s.f.). *Sensitivity analysis for modelling parameters used for advanced evacuation simulations: How important are the modelling parameters when conducting evacuation modelling?* Obtenido de http://c.yimcdn.com/sites/www.SFPE.org/resource/resmgr/PBD_Conference/MON-Conference_Proceeding/Mon_B_-_1205_-_Olaf_Perez.pdf
- Programa Estado de la Nación (2015) *Informe V - Estado de la Educación 2015*. Capítulo 4. La evolución de la educación superior. Obtenido de: <http://www.estadonacion.or.cr/educacion2015/assets/cap-4-ee-2015.pdf>
- Quintiere, J. (1998). *Principles of Fire Behavior*. 1st Edition. Boston: Cengage Learning
- SFPE (2007). *SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection*. 2nd Edition.
- SFPE (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5th Edition. New York: Springer.
- SFPE (2018). *SFPE Guide to Human Behavior in Fire*. 2nd Edition. Maryland: Springer
- Thunderhead Engineering (2017). *Technical Reference. Pathfinder 2017*. Manhattan, Kansas: Thunderhead Engineering.

Thunderhead Engineering (2017). *User Manual. Pathfinder 2017*. Manhattan, Kansas:
Thunderhead Engineering.

Thunderhead Engineering (2017). *PyroSim User Manual*. Manhattan, Kansas:
Thunderhead Engineering.

Weatherspark.com (2018). *Clima promedio en san pedro de costa rica durante todo el
año*. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/15456/clima-promedio-en-san-pedro-costa-rica-durante-todo-el-año>

Anexos

Anexo A. Análisis del riesgo en edificio administrativo

Cuadro A.1. Análisis del riesgo edificio administrativo UCR. (Los Autores, 2018).

Nivel	¿Qué pasa si...	Respuesta	Probabilidad	Escenario
				NFPA 101
6	Hay un incendio en el comedor?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio en la asociación de estudiantes?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Se reduce la cantidad de medios de egreso, además, el stand puede estar ubicado en un lugar sin detección de humos por lo que no habría notificación	Baja	2
	Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3

Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	El incendio es detectado por el sistema de detección de incendio y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Baja	5
Hay un incendio en la estación de trabajo en el cuarto de archivos?	El incendio alcanza el archivero y aumenta su propagación. El sistema de detección de incendio lo detecta y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Media	6
Hay un incendio en el edificio académico de la facultad de ingeniería?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Baja	7
Hay un incendio y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	El incendio se desarrolla hasta ser detectado por los ocupantes más cercanos al punto de	Baja	8

		ignición. El protocolo de evacuación se iniciaría de forma tardía.		
5	Hay un incendio en el comedor?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio en la asociación de estudiantes?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Se reduce la cantidad de medios de egreso, además, el stand puede estar ubicado en un lugar sin detección de humos por lo que no habría notificación	Baja	2
	Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
	Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Se desarrolla el incendio y es detectado	Baja	3

	por el sistema de detección de incendio.		
Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	El incendio es detectado por el sistema de detección de incendio y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Baja	5
Hay un incendio en la estación de trabajo en el cuarto de archivos?	El incendio alcanza el archivero y aumenta su propagación. El sistema de detección de incendio lo detecta y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Media	6
Hay un incendio en el edificio académico de la facultad de ingeniería?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Baja	7
Hay un incendio y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	El incendio se desarrolla hasta ser detectado por los ocupantes más cercanos al punto de ignición. El protocolo de evacuación se	Baja	8

		iniciaría de forma tardía.		
4	Hay un incendio en el comedor?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio en la asociación de estudiantes?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Se reduce la cantidad de medios de egreso, además, el stand puede estar ubicado en un lugar sin detección de humos por lo que no habría notificación	Baja	2
	Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
	Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3

Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	El incendio es detectado por el sistema de detección de incendio y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Baja	5
Hay un incendio en la estación de trabajo en el cuarto de archivos?	El incendio alcanza el archivero y aumenta su propagación. El sistema de detección de incendio lo detecta y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Media	6
Hay un incendio en el edificio académico de la facultad de ingeniería?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Baja	7
Hay un incendio y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	El incendio se desarrolla hasta ser detectado por los ocupantes más cercanos al punto de ignición. El protocolo de evacuación se iniciaría de forma tardía.	Baja	8

3	Hay un incendio en el comedor?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio en la asociación de estudiantes?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
	Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Se reduce la cantidad de medios de egreso, además, el stand puede estar ubicado en un lugar sin detección de humos por lo que no habría notificación	Baja	2
	Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
	Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
	Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	El incendio es detectado por el sistema de detección	Baja	5

		de incendio y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.		
	Hay un incendio en la estación de trabajo en el cuarto de archivos?	El incendio alcanza el archivero y aumenta su propagación. El sistema de detección de incendio lo detecta y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Media	6
	Hay un incendio en el edificio académico de la facultad de ingeniería?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Baja	7
	Hay un incendio y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	El incendio se desarrolla hasta ser detectado por los ocupantes más cercanos al punto de ignición. El protocolo de evacuación se iniciaría de forma tardía.	Baja	8
2	Hay un incendio en el comedor?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación	Media	1

	de iniciar la evacuación.		
Hay un incendio en la asociación de estudiantes?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1
Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Se reduce la cantidad de medios de egreso, además, el stand puede estar ubicado en un lugar sin detección de humos por lo que no habría notificación	Baja	2
Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	El incendio es detectado por el sistema de detección de incendio y se notifica a los ocupantes	Baja	5

		para iniciar la evacuación.		
	Hay un incendio en la estación de trabajo en el cuarto de archivos?	El incendio alcanza el archivero y aumenta su propagación. El sistema de detección de incendio lo detecta y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Media	6
	Hay un incendio en el edificio académico de la facultad de ingeniería?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Baja	7
	Hay un incendio y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	El incendio se desarrolla hasta ser detectado por los ocupantes más cercanos al punto de ignición. El protocolo de evacuación se iniciaría de forma tardía.	Baja	8
1	Hay un incendio en el comedor?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Media	1

Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Se reduce la cantidad de medios de egreso, además, el stand puede estar ubicado en un lugar sin detección de humos por lo que no habría notificación	Baja	2
Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Se desarrolla el incendio y es detectado por el sistema de detección de incendio.	Baja	3
Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	El incendio es detectado por el sistema de detección de incendio y se notifica a los ocupantes para iniciar la evacuación.	Baja	5
Hay un incendio en la estación de trabajo de la bodega de archivos del primer nivel de	El incendio alcanza el archivero y aumenta su propagación. El sistema de detección de incendio lo detecta y se notifica a los	Baja	1

la facultad de ingeniería?	ocupantes para iniciar la evacuación.		
Hay un incendio en la estación de trabajo en la secretaría del primer nivel de la facultad de ingeniería?	El sistema de detección de incendios lo detecta y se da la notificación de iniciar la evacuación.	Baja	1
Hay un incendio y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	El incendio se desarrolla hasta ser detectado por los ocupantes más cercanos al punto de ignición. El protocolo de evacuación se iniciaría de forma tardía.	Baja	8

Anexo B. Cálculo de ocupación

Cuadro B.1. Cálculo de ocupación por demanda máxima, Nivel 1.

(Los Autores, 2018)

Área	Observaciones	Total de Ocupantes	Total Personal Administrativo	Total Personal Estudiantes
Oficina Decano-104	-			
Atención al Público	-			
Sala de Espera	8 asientos			
Secretaría				
Secretaría-105	3 asientos			
Dirección				
Administrativa-106	3 asientos			
Bodega Archivo Activo	Normalmente no ocupado			
Bodega Archivo Pasivo	Normalmente no ocupado			
Sala Consejo Facultad-107	Normalmente no ocupado	27	13	14
Bodega de Computo	Normalmente no ocupado			
Mant. Equipo Computo	Normalmente no ocupado			
Taller Equipo Computo	Normalmente no ocupado			
Bodega	Normalmente no ocupado			
Servidor	Normalmente no ocupado			
Oficina RID	4 asientos			
Comedor-108	Normalmente no ocupado (8 asientos)			

Cuarto de Lactancia	-	0	0	0
Cuarto Eléctrico Principal	Normalmente no ocupado	0	0	0
MDF	Normalmente no ocupado	0	0	0
Bodega Artículos Limpieza	Normalmente no ocupado			
Vestidores	Normalmente no ocupado	0	0	0
Comedor	Normalmente no ocupado (8 asientos)			
Aula-112	Máxima capacidad	37	5	32
Aula-113	Máxima capacidad	36	5	31
Sala Reunión-127	Normalmente no ocupado	0	0	0
CEI-128	-	2	1	1
Oficina-129	-			
CASE-130	3 asientos			
Oficina-131	-			
Oficina-132	-	11	6	5
Oficina-135	-			
Sala Reunión-133	Normalmente no ocupado			
Sala de Computo Grande A	Máxima capacidad	41	1	40
Sala de Computo Grande B	Máxima capacidad	41	1	40
Depósito Libros / Revistas	Normalmente no ocupado			
Recepción Biblioteca	4 asientos	49	3	46
Consulta Libros	8 asientos			
Referencias	4 asientos			
ADM CEDDA	3 asientos			

Centro CEDI	Máxima capacidad			
Sala de Estudio	6 asientos			
Grupo A				
Sala de Estudio	6 asientos			
Grupo B				
Sala de Estudio	6 asientos			
Grupo C				
N.D.-153	-	0	0	0
Oficina A	2 asientos			
Oficina B	5 asientos	9	6	3
Oficina C	2 asientos			
Aula-154	Máxima capacidad	35	5	30
Pasillos y	Máxima capacidad	0	0	0
Vestíbulo				
Total		288	46	242
Porcentaje		100%	16%	84%

Cuadro B.2. Cálculo de ocupación por demanda máxima, Nivel 2.

(Los Autores, 2018)

Área	Observaciones	Total de Ocupantes	Total Personal Administrativo	Total Personal Estudiantes
Coordinación				
Acción Social-201				
Secretaría-259	6 asientos			
Dirección-202	8 asientos			
Oficina				
Administrativa-203	3 asientos			
Coordinación y Acreditación-204	3 asientos	23	11	12
Programación Específica-205	4 asientos			
Sala Reunión-206	Normalmente no ocupado (12 asientos)			
Bodega de Archivos-207	Normalmente no ocupado			
Cubículos de Profesores-209	2 asientos			
Cubículos de Profesores-210	2 asientos			
Cubículos de Profesores-211	2 asientos			
Cubículos de Profesores-212	2 asientos	30	15	15
Cubículos de Profesores-213	2 asientos			
Cubículos de Profesores-214	2 asientos			
Cubículos de Profesores-215	2 asientos			
Cubículos de Profesores-216	2 asientos			

Cubículos de Profesores-217	2 asientos			
Cubículos de Profesores-218	2 asientos			
Cubículos de Profesores-219	2 asientos			
Cubículos de Profesores-220	2 asientos			
Cubículos de Profesores-221	2 asientos			
Cubículos de Profesores-222	2 asientos			
Cubículos de Profesores-223	2 asientos			
Centro de Documentación-208	Normalmente no ocupado	0	0	0
Bodega-224	Normalmente no ocupado			
Comedor-225	Normalmente no ocupado (10 asientos)	0	0	0
Oficina Acción Social-226		4	3	1
Oficina-227	2 asientos			
Secretaría-231	7 asientos	9	2	7
Maestría-232	8 asientos			
Sala Grupal 6 Personas-233	Máxima capacidad			
Sala Individual 7 Personas-235	Máxima capacidad	18	0	18
Sala Grupal 6 Personas-236	Máxima capacidad			
Asociación-234	6 asientos	6	0	6
Sala de Estudio Individual-238	27 asientos	27	0	27

Sala Computo BYOD-240	Máxima capacidad	41	1	40
Sala Computo BYOD-241	Máxima capacidad	41	1	40
Sala Computo BYOD-242	Máxima capacidad	41	1	40
Sala Computo BYOD-243	Máxima capacidad	41	1	40
IDF-244	Normalmente no ocupado	0	0	0
RID-245	Normalmente no ocupado			
Sala Computo Acción Social-247	41 asientos	41	1	40
Cubículos de Profesores-248	2 asientos			
Cubículos de Profesores-249	2 asientos			
Cubículos de Profesores-250	2 asientos	19	10	9
Cubículos de Profesores-251	2 asientos			
Cubículos de Profesores-252	2 asientos			
Cubículos de Profesores-253	9 asientos			
Pasillos y Vestíbulo	Máxima capacidad	0	0	0
Total		341	46	295
Porcentaje		100%	13%	87%

Cuadro B.3. Cálculo de ocupación por demanda máxima, Nivel 3.

(Los Autores, 2018)

Área	Observaciones	Total de Ocupantes	Total Personal Administrativo	Total Personal Estudiantes
Recepción Acción Social-301	6 asientos			
Oficina Acción Social-302				
Oficina-303				
Dirección-304	8 asientos			
Oficina Administrativa-305	3 asientos			
Sala de Reuniones-306	Normalmente no ocupado (12 asientos)			
Oficina-307	4 asientos	32	18	14
Sala de Profesores-308	Normalmente no ocupado (18 asientos)			
Oficina-326	2 asientos			
Oficina-327	2 asientos			
Bodega y Archivos-328	Normalmente no ocupado			
Bodega Papel y Documentos-329	Normalmente no ocupado			
Dirección Acción Social-330	3 asientos			
Secretarias-331				
Bodega-309	Normalmente no ocupado			
Docentes-310	2 asientos			
Docentes-311	2 asientos	32	22	10
Docentes-312	2 asientos			
Docentes-313	2 asientos			
Docentes-314	2 asientos			
Docentes-315	2 asientos			

Docentes-316	2 asientos			
Docentes-317	2 asientos			
Docentes-318	2 asientos			
Docentes-319	2 asientos			
Docentes-320	2 asientos			
Docentes-321	2 asientos			
Docentes-322	2 asientos			
Docentes-323	2 asientos			
Docentes-324	2 asientos			
Docentes-325	2 asientos			
Comedor Asociación-335	16 asientos			
Asociación-336	8 asientos	8	0	8
Bodega-337	Normalmente no ocupado			
Sala Estudio Grupal-338	Máxima capacidad			
Sala Estudio Grupal-339	Máxima capacidad			
Sala Estudio Grupal-342	Máxima capacidad	32	0	32
Sala Estudio Grupal-343	Máxima capacidad			
Sala Estudio Grupal-367	Máxima capacidad			
Sala Estudio Individual-340	28 asientos	28	0	28
Sala de Computo- 344	Máxima capacidad	41	1	40
Sala de Computo- 345	Máxima capacidad	57	1	56
Sala de Computo- 346	Máxima capacidad	50	1	49
Acción Social-347	2 asientos	2	2	0

Sala Reuniones Acción Social-348	Normalmente no ocupado (10 asientos)			
IDF-AA2-349	Normalmente no ocupado	0	0	0
RID-350	Normalmente no ocupado			
Sala de Computo- 352	Máxima capacidad	41	1	40
Cubículo Profesores-353	2 asientos			
Cubículo Profesores-354	2 asientos			
Cubículo Profesores-355	2 asientos			
Cubículo Profesores-356	2 asientos	16	8	8
Cubículo Profesores-357	2 asientos			
Cubículo Profesores-358	2 asientos			
Cubículo Profesores-359	2 asientos			
Cubículo Profesores-360	2 asientos			
Pasillos y Vestíbulo		0	0	0
Total		339	54	285
Porcentaje		100%	16%	84%

Cuadro B.4. Cálculo de ocupación por demanda máxima, Nivel 4.

(Los Autores, 2018)

Área	Observaciones	Total de Ocupantes	Total Personal Administrativo	Total Personal Estudiantes
Archivo-401	Normalmente no ocupado			
Dirección Ing. Química-402	8 asientos			
Secretaría Administrativa-403	3 asientos			
Sala de Reuniones - 404	10 asientos			
Sala de Profesores- 405	10 asientos	18	8	10
Oficina-406				
Oficina-408				
Oficina-409				
Archivo-410	Normalmente no ocupado			
Secretaría-411	6 asientos			
Sala de Espera-412	5 asientos			
Computo-413	Máxima capacidad	57	1	56
Oficinas Profesores-414	2 asientos			
Oficinas Profesores-415	2 asientos			
Oficinas Profesores-416	2 asientos			
Oficinas Profesores-417	2 asientos	32	13	19
Oficinas Profesores-418	2 asientos			
Oficinas Profesores-419	2 asientos			

Oficina Profesores-423	6 asientos			
Oficina Profesores-424	6 asientos			
Oficina Profesores-425	2 asientos			
Oficina Profesores-426	6 asientos			
Sala de Sesiones-420	Máxima capacidad	34	3	31
Investigación-421	3 asientos			
Acción Social-422	3 asientos			
Sala de Estudio Individual-431	18 asientos	18	0	18
Sala de Estudio Individual-432	14 asientos			
Asociación-433	Máxima capacidad			
Sala de Estudio Individual-434	14 asientos			
Sala de Estudio Grupal-435	Máxima capacidad	51	0	51
Sala de Estudio Grupal-436	Máxima capacidad			
Sala de Estudio Grupal-437	Máxima capacidad			
Computo-439	Máxima capacidad	41	1	40
Exposición-440	Máxima capacidad	22	1	21
Exposición-441	Máxima capacidad	22	1	21
Exposición-442	Máxima capacidad	43	1	42
Oficina-443	6 asientos			
Acreditación				
Acción Social-444		12	8	4
Sala de Reuniones-445	Normalmente no ocupada (6 asiento)			
Oficina-446	2 asientos	8	4	4

Oficina-447	2 asientos			
Investigación Maestría-448	4 asientos			
IDF-AA2-449	Normalmente no ocupado	0	0	0
RID-450	Normalmente no ocupado			
Cubículo de Investigación-452	2 asientos			
Bodega de Archivo-453	Normalmente no ocupado	11	4	7
Recepción y Sala de Espera-454	6 asientos			
Director de Maestría-455	3 asientos			
Cubículos de Estudio-457	4 asientos			
Secretaría-458	4 asientos			
Dirección-459	3 asientos	13	9	4
Archivo-460	Normalmente no ocupado			
Sala de Reuniones- 461	Normalmente no ocupada (6 asiento)			
Pasillos y Vestíbulo		0	0	0
Total		382	54	328
Porcentaje		100%	14%	86%

Cuadro B.5. Cálculo de ocupación por demanda máxima, Nivel 5.

(Los Autores, 2018)

Área	Observaciones	Total de Ocupantes	Total Personal Administrativo	Total Personal Estudiantes
Secretaría y Espera-501	4 asientos			
Dirección-502	8 asientos			
Oficina Administrativa-503	3 asientos			
Oficina Profesores -504	5 asientos			
Sala de Reuniones-505	10 asientos	23	16	7
Bodega-515	Normalmente no ocupado			
Bodega de Archivo-516	Normalmente no ocupado			
Oficina-517	2 asientos			
Oficina Secretaría-566	3 asientos			
Cubículos Individuales-506	2 asientos			
Coordinación-514	3 asientos			
Cubículos Individuales-557	2 asientos			
Cubículos Individuales-558	2 asientos	21	10	11
Cubículos Individuales-559	2 asientos			
Cubículos Individuales-560	2 asientos			
Cubículos Individuales-561	2 asientos			

Cubículos Individuales-562	2 asientos			
Cubículos Individuales-563	2 asientos			
Cubículos Individuales-564	2 asientos			
Comedor-507	Normalmente no ocupado (16 asientos)	0	0	0
Sala Reuniones-508	Normalmente no ocupado (8 asientos)			
Sala de Computo-509	Máxima capacidad			
Computo de Docencia-510	Normalmente no ocupado (33 asientos)	51	3	48
Oficina-511				
Bodega-512	Normalmente no ocupado			
Sala Reuniones-513	Normalmente no ocupado (8 asientos)			
Sala de Estudio-521	12 asientos			
Asociación Ing. Agrícola-522	4 asientos	24	0	24
Salas de Estudio-527	6 asientos			
Oficina de Post Grado-528	2 asientos			
Asociación Ing. Agrícola-523	4 asientos			
Salas de Estudio-524	14 asientos	30	0	30
Salas de Estudio-525	6 asientos			
Salas de Estudio-526	6 asientos			

Cubículo Individual-530	3 asientos			
Cubículo Individual-531	3 asientos			
Cubículo Individual-532	3 asientos			
Cubículo Individual-533	3 asientos			
Cubículo Individual-534	3 asientos			
Cubículo Individual-535	3 asientos	37	15	22
Cubículo Individual-536	3 asientos			
Cubículo Individual-537	3 asientos			
Cubículos Compartidos-538	7 asientos			
Bodega-539	Normalmente no ocupado			
Sala Grupal-540	6 asientos			
Aula-541	Máxima capacidad	43	1	42
Sala de Computo-542	Máxima capacidad	41	1	40
IDF-AA2-543	Normalmente no ocupado	0	0	0
RID-544	Normalmente no ocupado			
Bodega de Archivos-546	Normalmente no ocupado			
Sala de Reuniones-547	10 asientos	15	9	6
Oficina Administrativa-548	3 asientos			
Dirección-549	8 asientos			

Secretaría-550	3 asientos		
Acreditación e Investigación-551	6 asientos		
Comedor-552	10 asientos		
Pasillos y Vestíbulo		0	0
Total		285	55
Porcentaje		100%	19%
			81%

Cuadro B.6. Cálculo de ocupación por demanda máxima, Nivel 6.

(Los Autores, 2018)

Área	Observaciones	Total de Ocupantes	Total Personal Administrativo	Total Personal Estudiantes
Archivo Activo-601	Normalmente no ocupado (1 asiento)			
Secretaría-602	1 asiento			
Administrativa-603	5 asientos			
Dirección -604	6 asientos			
Sala de Reuniones-605	Normalmente no ocupado (11 asientos)			
Comedor-606	Normalmente no ocupado (10 asientos)			
Sala de Reuniones-607	Normalmente no ocupado (14 asientos)			
Documentación-608	1 asiento	48	41	7
Oficina-616	1 asiento			
Coordinación-617	1 asiento			
Sala de Reuniones-618	10 asientos			
Archivo Pasivo-619	Normalmente no ocupado			
Secretaría-620	1 asiento			
Coordinación-621	1 asiento			
Esc. Ing. Recepción y Espera-622	8 asientos			
Sala de Trabajo-609	6 asientos			
Videoteca-610				
Área de Cubículos-611	9 asientos	33	33	0
Bodega de Videoteca-612	Normalmente no ocupado			
Sala de Trabajo-613	6 asientos			

Sala de Trabajo-614	6 asientos			
Sala de Trabajo-615	6 asientos			
Área de Cubículos-658	1 asiento			
Área de Cubículos-659	1 asiento			
Área de Cubículos-670	1 asiento			
Laboratorio Computación-628	Máxima capacidad	33	1	32
Taller de Computo-629	Normalmente no ocupado	0	0	0
Asociación-630	Se asume	6	0	6
Sala de Reuniones-632	6 asientos			
Sala de Reuniones-633	6 asientos			
Sala de Reuniones-634	6 asientos			
Oficina-635	2 asientos			
Sala de Reuniones-636	8 asientos	46	46	0
Cubículos Docentes-637	4 asientos			
Cubículos Docentes-638	4 asientos			
Cubículos Docentes-639	10 asientos			
Aula-640	Capacidad máxima	43	1	42
IDF-AA2-641	Normalmente no ocupado	0	0	0
RID-642	Normalmente no ocupado			
Cubículos Topografía-644	2 asientos	6	2	4

Oficina Topografía-645	4 asientos			
Oficina-652	3 asientos			
Bodega-AA2-646	Normalmente no ocupado			
Oficina-647	3 asientos			
Oficina-648	4 asientos			
Oficina-649	3 asientos	16	6	10
Sala de Reuniones-650	11 asientos			
Oficina-651	3 asientos			
Pasillos y Vestíbulo		0	0	0
Total		231	130	101
Porcentaje		100%	56%	44%

Anexo C. Estadísticas poblacionales

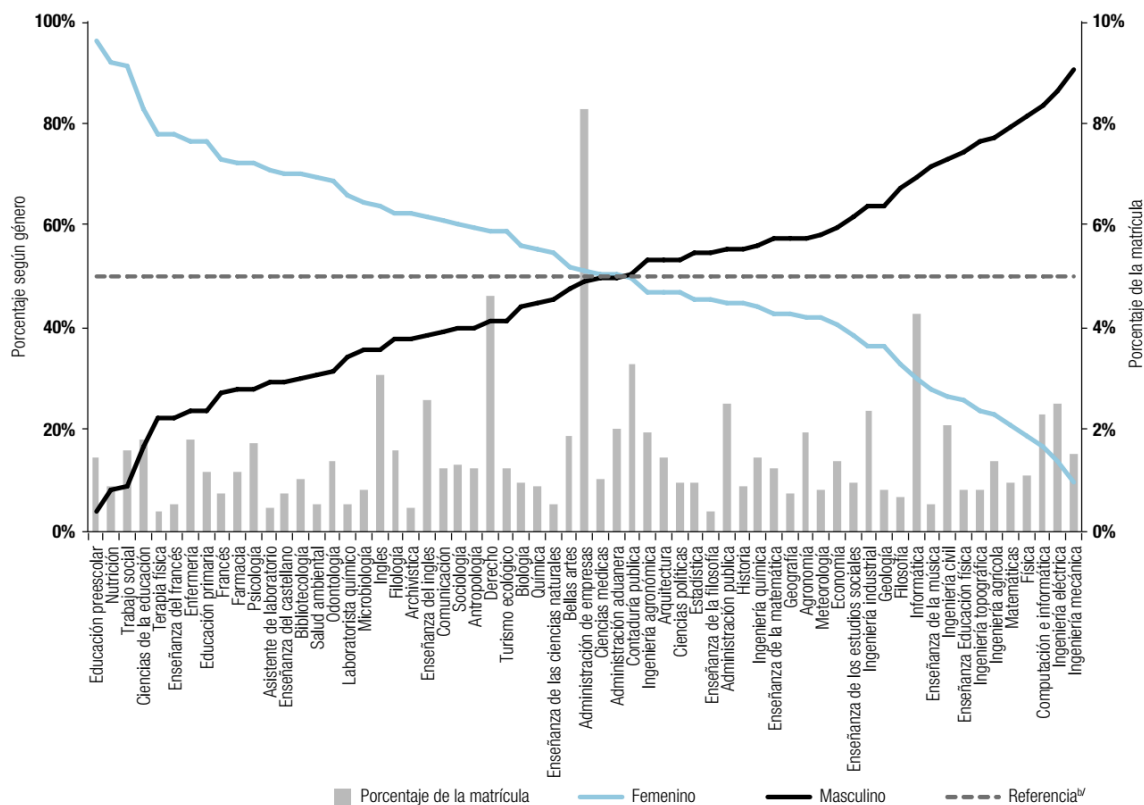


Figura C.1. Distribución de la matrícula por carreras en la Universidad de Costa Rica, según predominio de género. (Programa Estado de la Nación, 2015)

Anexo D. Extracto normativo

Cuadro D.1. Principales modificadores de comportamiento en cada categoría de escenario según ISO 16378:2009^l (ISO, 2009)

A	Efecto del sistema de alarma en el pre-movimiento
A1	Detección automática en todo el edificio, activando una alarma general inmediata para los ocupantes de todas las partes afectadas del edificio.
A2	La detección automática en todo el edificio proporciona una pre-alarma para la administración o la seguridad, con un sistema de advertencia general activado manualmente que suena en todas las áreas ocupadas afectadas y una alarma general después de un retraso fijo si la pre-alarma no se cancela.
A3	La detección local automática y la alarma solo están cerca de la ubicación del incendio o no hay detección automática, con un sistema de advertencia general activado manualmente que suena en todas las áreas ocupadas afectadas.
B	Efecto de la complejidad del edificio en el tiempo de evacuación a una ruta de escape protegida
B1	Representa un edificio rectangular simple de una sola planta, con uno o pocos recintos y un diseño simple con buen acceso visual, diseñado de manera prescriptiva con distancias cortas de viaje y un buen nivel de provisión de salidas con salidas que conducen directamente al exterior del edificio.
B2	Representa un edificio simple de varios recintos (generalmente de varios pisos), con la mayoría de las funciones diseñadas de manera prescriptiva y diseños internos simples.
B3	Representa un gran edificio complejo. Esto incluye grandes complejos de edificios con la integración de una serie de edificios existentes en el mismo sitio, comunes con los antiguos hoteles o grandes almacenes, y también grandes complejos modernos como centros de ocio, centros comerciales y aeropuertos. Las características importantes son que el diseño interno y los recintos a

menudo involucran espacios grandes y complejos para que los ocupantes puedan encontrar dificultades de ubicación durante la evacuación y, por lo tanto, la gestión de la evacuación presenta desafíos particulares.

M Clasificación de las características y efectos de la gestión de la seguridad contra incendios en el tiempo de evacuación.

M Los ocupantes normales (personal o residentes) deben recibir capacitación para
1 un alto nivel de administración de protección contra incendios, con buenas prácticas de prevención y mantenimiento contra incendios, vigilantes de pisos, un plan de emergencia bien desarrollado y simulacros regulares. Para "despierto y no familiar", debe haber una alta proporción de personal capacitado para los visitantes. El sistema y los procedimientos están sujetos a certificación independiente, incluida una auditoría periódica con evacuaciones supervisadas para las cuales el rendimiento debe coincidir con el rendimiento de diseño asumido. Los videos de seguridad de cualquier incidente o alarma no deseada están disponibles para auditoría bajo el esquema de certificación. Este nivel generalmente también implicaría un edificio bien diseñado con rutas de escape obvias y fáciles de usar (al nivel B1 o al menos B2), con detección automática y sistemas de alarma para un alto nivel de provisión (nivel A1). Si es utilizado por el público, se debe proporcionar un sistema de alarma por voz.

M Similar al nivel 1, pero tienen una proporción de personal más baja y los
2 guardias de piso pueden no estar siempre presentes. Puede que no haya una auditoría independiente. Las características del edificio pueden ser nivel B2 o B3 y nivel de alarma A2. Los tiempos de escape y evacuación del diseño serán más conservadores que para un sistema de nivel M1.

M Representa instalaciones estándar con requerimientos de protección contra
3 incendios mínimos. No hay auditorías externas. El edificio puede ser B3 y el sistema de alarma A3. Esto no es adecuado para un diseño de ingeniería contra incendios, a menos que se tomen otras medidas para garantizar la seguridad,

como las restricciones en el rendimiento del contenido de los incendios, altos niveles de protección pasiva y / o sistemas activos.

¹ Este cuadro corresponde a un extracto del estándar *ISO/TR 16738. Fire-safety engineering — Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people (1st Ed.)* en su idioma original, inglés. Los autores no se hacen responsables por la exactitud y veracidad de la traducción al español. En caso de conflicto siempre prevalecerá la versión original en inglés.

Anexo E. Informe de diseño de ingeniería

INFORME DE DISEÑO DE INGENIERÍA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EDIFICIO ADMINISTRATIVO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

1. Equipo de trabajo del proyecto

El equipo de trabajo se divide en 2 grupos. El primer grupo es el encargado del desarrollo y análisis del proyecto, el segundo se encarga de la revisión del mismo.

A continuación se listan los participantes de cada grupo.

1.1. Desarrollo y análisis realizado por:

- Michael Alcázar Fallas, estudiante de ingeniería mecánica con énfasis en Protección contra incendios de la UCR.
- Luis Roberto Bolaños Esquivel, estudiante de ingeniería mecánica con énfasis en Protección contra incendios de la UCR.
- Silvio Alberto García Aguirre, estudiante de ingeniería mecánica con énfasis en Protección contra incendios de la UCR.

1.2. Revisado por:

- Ing. Luis Flores Quirós
- Ing. José Alberto Rodríguez Porras
- Ing. Mauricio Meneses Flaque

2. Referencia utilizada

El Cuadro resume las principales referencias. Las mismas se dividieron en tres grupos, según lo siguiente:

- Códigos desarrollados por consenso (NFPA), organizaciones elaboradoras de códigos u organismos gubernamentales.
- Referencias técnicas (expuestas a revisión), revistas de prestigio e informes.
- Publicaciones de apoyo ampliamente reconocidas (SFPE).

Cuadro 1. Referencias utilizadas en el análisis. (Los Autores, 2018)

Función	Nombre	Tipo de referencia
Análisis por desempeño	Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, Manual de Disposiciones Técnicas Generales Sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios, Versión 2013	Publicación de apoyo
	NFPA 101®: Life Safety Code®	Código por consenso
	SFPE Engineering Guide to Performance Based Fire Protection, 2 nd Edition	Publicación de apoyo
	ISO 23932:2009 - Fire safety engineering -- General principles	Código por consenso
	ISO/TS 16733:2006 Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires	Código por consenso
	Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, Análisis e investigación de incendios al 31 de diciembre 2017	Referencia técnica
	Handbook of Occupational Safety and Health, 2 nd Edition (Lou Diberardinis), “Chapter 6: Risk Assessment Techniques,”	Publicación de apoyo
	Performance-Based Fire Safety Design (Morgan J. Hurley, Eric R. Rosenbaum)	Publicación de apoyo
	ISO/TR 16738:2009 Fire-safety engineering -- Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people	Código por consenso
	IMO MSC.1/Circ.1238 Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships	Referencia técnica

	SFPE Guide to Human Behavior in Fire, 2 nd Edition	Publicación de apoyo
	NIST Technical Note 1680A Review of Building Evacuation Models, 2 nd Edition	Publicación de apoyo
	NFPA 72®: National Fire Alarm and Signaling Code®	Código por consenso
	NFPA 70®: National Electrical Code®	Código por consenso
Simulación	NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems	Código por consenso
de	NIST NCSTAR 1-5C Fire Test of Single Office Workstations	Referencia técnica
incendios	NIST Special Publication 1018 Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide.	Referencia técnica

3. Abreviaturas

ASET: Available Safe Egress Time (Tiempo de Egreso Seguro Disponible)

BCBCR: Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica

FDS: Fire Dynamics Simulator (Simulador de Dinámica del Fuego)

HRR: Heat Rate Release (Tasa de liberación o sesión de calor)

NCFS: National Center For Forensic Science (Centro Nacional de Ciencia Forense)

NFPA: National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección Contra Incendios)

NIST: National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología)

RSET: Required Safe Egress Time (Tiempo de Egreso Seguro Requerido)

SFPE: Society of Fire Protection Engineers (Sociedad de Ingenieros de Protección Contra Incendios)

UCR: Universidad de Costa Rica

4. Información general del proyecto

La información que a continuación se presentan resume características como las áreas que se van a analizar, los potenciales riesgos del fuego y el nivel de seguridad requerido. Esta información sirve como una útil herramienta para asegurar el mejor entendimiento del análisis a desarrollar.

4.1. Alcance del proyecto

La finalidad de este trabajo fue realizar un análisis por desempeño del comportamiento de un edificio en términos de seguridad humana en caso de un incendio, el cual sirva como una referencia para los profesionales de protección contra incendios en Costa Rica, y la aplicación de este método.

Conscientes del hecho de que cada edificio es único, y de la misma manera su análisis, se necesitó realizar varias suposiciones con el fin de limitar a uno solo la cantidad de escenarios solicitados por la NFPA 101, y así generar los resultados con que se evaluaron los tiempos ASET y RSET.

Se tomaron en cuenta factores como, las características del edificio, las de los ocupantes y las del combustible. Además, se consideraron otras que podrían afectar el desempeño, tales como regulaciones aplicables, localización de la propiedad, instalaciones auxiliares, preservación histórica, consideraciones medioambientales operación y mantenimiento.

Las herramientas computacionales utilizadas para las simulaciones fueron Pathfinder® y PyroSim®, ambos desarrollados por la compañía Thunderhead Engineering.

Se limitó a aplicar el método de diseño por desempeño descrito por la NFPA 101, el cual es el Código de Seguridad Humana que se encuentra vigente en el país.

Cabe destacar que para el estudio realizado se tomaron las siguientes consideraciones:

- El análisis se llevó a cabo en los edificios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica en la Ciudad de la Investigación.
- Los planos que se utilizaron para el estudio fueron suministrados por la Universidad de Costa Rica, los cuales se asumieron como planos finales de construcción.

- Debido a que el análisis es enfocado en seguridad humana, no se toma en cuenta la resistencia estructural del edificio. Se asumió que el mismo fue diseñado de manera que puede resistir el escenario de fuego seleccionado.
- Debido al tipo de ocupación, OSHA no solicita que se cuente con una brigada contra incendios, por lo tanto no se considera la existencia de alguna en el lugar.
- Dado que es un edificio nuevo, el sistema eléctrico no se analizó y se asumió que cumple con los requerimientos mínimos de la normativa vigente.
- Se tomó en cuenta la cantidad de personas y su distribución en cuanto a edades y sexo.
- El área, la geometría y la altura de los pisos fue basada en mediciones realizadas en campo y en los planos suministrados por la UCR.
- La posición, el tamaño y la cantidad de aberturas (puertas y ventanas) fueron considerados según los planos suministrados por la UCR.
- El edificio está dividido en dos torres de seis niveles, interconectadas por un puente sobre la entrada principal de la estructura, sin embargo, para el análisis solo fue considerada una torre, la de administración.
- La carga de fuego se estableció mediante un análisis del riesgo, fundamentado con visitas de campo al edificio. Además, se utilizaron bases de datos como las estadísticas de incendios del BCBCR.
- Se constató con el uso de planos y visitas que el edificio administrativo cuenta con 4 salidas de emergencia por cada piso, que están claramente señalizadas y que descargan a los puntos de reunión del primer nivel, ubicados en los costados este, noroeste y sureste.
- Se constató con el uso de planos y visitas que los edificios cuentan con sistema de detección y alarma, basado en detectores de humo fotoeléctricos y estaciones manuales. También cuentan con sistema de notificación mediante luces estroboscópicas y sirenas. El sistema de supresión es basado en estaciones manuales semiautomáticas Clase II, complementado con extintores para fuegos clase ABC. Todos los equipos mencionados están diseñados, operando y mantenidos según la normativa NFPA que le concierne.
- No fue tomado en cuenta el nivel sonoro ya que se supone que el sistema de detección y alarma fue diseñado según la normativa vigente NFPA 72. El edificio se usa en horario de lunes a viernes (7:00 – 22:00) y sábados (7:00 12:00) para impartir lecciones, mientras que las oficinas administrativas atienden en un horario de oficina

lunes a viernes (8:00 – 17:00). Para el análisis se seleccionó una hora de alta demanda en un día de ocupación normal, Lunes a viernes (8:00 -16:00).

- Los factores ambientales fueron supuestos con ayuda del sitio web *es.weatherspark.com* para la zona donde se encuentra el edificio.
- Velocidad del viento: 4,2 km/h
- Dirección del viento: sureste
- Temperatura ambiente y humedad: 21° C @ 30 %.
- No se tomaron en cuenta propiedades de los materiales de construcción de los elementos no estructurales como paredes, divisiones, ventanas, puertas, suelos y cielos.
- No se tomaron en cuenta los componentes estructurales tales como; localización tamaño y soporte de cargas, materiales de construcción, materiales de protección de incendios y cargas estructurales de diseño.
- No fueron tomados en cuenta para el análisis los servicios operativos y procesos propios del edificio, por ejemplo equipos de ventilación mecánica.
- No se consideró el tiempo de respuesta de cuerpo de bomberos, debido al tipo de análisis.
- Los resultados no deben utilizarse sin el permiso de los autores.

4.2 Propósito del análisis

Para establecer el propósito del análisis se utilizó la normativa NFPA 101 en su capítulo 4, el cual detalla el nivel de protección requerido. Dichos niveles de protección se dividieron en supervivencia de los ocupantes involucrados con el incendio y protección de los ocupantes involucrados con el incendio de manera indirecta.

Supervivencia

Meta: Corroborar la supervivencia de las personas que se encuentran involucradas en el escenario de fuego.

Protección

Meta: corroborar que la protección es la necesaria para que los ocupantes no involucrados con el fuego de manera directa no se vean afectados en su proceso de evacuación del edificio.

4.3 Objetivos y criterios de desempeño

Para establecer los objetivos y criterios de desempeño utilizados en el análisis se utilizó la normativa NFPA 101 en su capítulo 5, el cual detalla los parámetros de protección requeridos por el análisis.

La misma normativa establece los 4 métodos para establecer el análisis por desempeño, los cuales se detallan a continuación:

- Método 1: asegurar que los ocupantes no serán incapacitados por los efectos del fuego, entre ellos visibilidad, daño térmico y toxicidad.
- Método 2: demostrar que cada área será evacuada completamente antes de que los ocupantes se vean expuestos a los efectos del fuego (Pérdida de visibilidad, daño térmico y toxicidad).
- Método 3: demostrar que la capa de humo y gases tóxicos no descenderá en cualquier cuarto ocupado, de manera que los que los ocupantes se vean expuestos a los efectos del fuego (Pérdida de visibilidad, daño térmico y toxicidad).
- Método 4: demostrar que ningún cuarto ocupado se verá afectado por los efectos del fuego.

De los cuatro métodos anteriores, se seleccionó solamente uno para realizar el análisis. Se utiliza el que más se adecua al alcance y propósito de este.

El método 4 es el más conservador de todos, ya que en este no se requiere realizar evacuación de los ocupantes, dado que el objetivo de este método es demostrar que ningún cuarto ocupado se verá afectado por incendio. Dado esto, se descarta por no considerar el alcance del proyecto el cual es realizar un análisis de la evacuación del edificio.

El método 3 el objetivo es demostrar que la capa de humo y gases tóxicos no descenderán a niveles peligrosos para los ocupantes, por lo que no se verán afectados. Por lo tanto, este método tampoco involucra las características de los ocupantes y la evacuación del edificio en caso de incendio, es por este motivo que se descarta este método.

El método 1 si bien es cierto es de los menos conservadores de la lista, define una serie de condiciones que se deben conocer de antemano como la fracción de dosis efectiva respirada para incapacitar a los ocupantes lo cual sugiere realizar un análisis químico de la combustión,

lo cual se aleja del alcance del proyecto el cual es hacer una comparación entre el ASET y el RSET; por lo tanto, este método se descarta.

Finalmente, se selecciona el método 2 para realizar el análisis ya que es el más adecuado para cumplir con las metas del proyecto, debido a que se consideran las características de los ocupantes y el fuego en caso de evacuación.

El siguiente cuadro resume las metas, los objetivos y los criterios de desempeño utilizados en el análisis.

Cuadro 2. Resumen criterios de desempeño. (Los Autores, 2018)

Meta de protección contra incendios	Objetivo de diseño	Criterio de desempeño prescrito	Criterio específico
Protección de los ocupantes que no están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego [NFPA 101:4.1.1(1)]	Una estructura debe ser diseñada, construida y mantenida para proteger los ocupantes que no están íntimamente relacionados con el desarrollo inicial del fuego durante el tiempo necesario para ser evacuados, reubicados o defendidos en el lugar [NFPA 101:4.2.1]	Un ocupante que no esté relacionado íntimamente con la ignición no debe estar expuesto a condiciones instantáneas o acumulativas insostenibles [NFPA 101:5.2.2]	Mantener los niveles de visibilidad (4,0 m) y daño térmico debajo del nivel máximo apto para sobrevivir y evacuar el escenario del fuego.
Mejoramiento de la capacidad de supervivencia de los ocupantes que están íntimamente	Los sistemas utilizados para lograr las metas de la Sección 4.1 deben ser efectivos para mitigar el riesgo o	Un ocupante que no esté relacionado íntimamente con la ignición no	Mantener los niveles de visibilidad (4,0 m) y daño térmico debajo del nivel máximo apto para sobrevivir y

relacionados con el desarrollo inicial del fuego [NFPA 101:4.1.1(2)]	condición para la que están siendo utilizados, deben ser confiables, deben mantenerse en el nivel para el que fueron diseñados para operar, y deben permanecer en funcionamiento [NFPA 101:4.2.3]	debe está expuesto a condiciones instantáneas o acumulativas insostenibles [NFPA 101:5.2.2]	evacuar el escenario del fuego.
---	---	---	---------------------------------

4.4. Identificación selección métodos de evaluación

La NFPA 101 (2018) en el Capítulo 5, establece las pautas a seguir en el análisis por desempeño basado en seguridad humana, mismo que se realizó en el edificio de ingeniería de la UCR, Sede Central. Este indica que los primeros pasos para realizar dicho análisis es establecer los escenarios de incendio a evaluar. La misma norma establece 8 escenarios típicos a considerar en cualquier edificación en general, los cuales son:

- Escenario de diseño 1: es un escenario que represente un incendio típico de la ocupación analizada.
- Escenario de diseño 2: es un incendio de tipo ultra rápido desarrollado cerca o en los medios principales de egreso y estos con las puertas interiores abiertas.
- Escenario de diseño 3: un incendio que empiece en una ocupación normalmente cerrada y que puede poner un gran número de ocupantes en riesgo.
- Escenario de diseño 4: un incendio que se origine en una pared o cielo que este junto a un salón grande y ocupado.
- Escenario de diseño 5: un incendio de tipo lento no alcanzado por el sistema de protección contra incendios en cercana proximidad de un área de gran ocupación.
- Escenario de diseño 6: es el incendio más severo que se pueda obtener debido un gran número de combustibles agrupados debido a la operación normal del edificio.
- Escenario de diseño 7: es un incendio de exposición exterior que se propaga y desarrolla condiciones intolerables dentro del área.

- Escenario de diseño 8: es un incendio de combustibles ordinarios con los sistemas pasivos y activos de protección de incendios independientemente ineficaces.

Por lo tanto, se deben analizar los casos y establecer cuáles son aplicables o no a la edificación en estudio. Con ayuda de los planos del proyecto se ubicaron posibles lugares críticos a partir de los 8 escenarios de la NFPA 101 (2018).

Una vez ubicado en planos los posibles escenarios de diseño, se realiza una visita a sitio para realizar un levantamiento visual y fotográfico para verificar las propuestas de ubicación de los escenarios en planos. Se validan las cargas de combustibles reales en sitio.

Posterior a la visita, se selecciona a partir de la comparación entre escenarios del fuego teóricos descritos en la NFPA 101 con las cargas reales existentes en el lugar, los puntos críticos en la edificación.

Debido al tiempo que se demora cada análisis de punto crítico, se procede a realizar un análisis del riesgo final basado en el método “qué pasa si...” donde se determina el punto de estudio del trabajo; el cual es un incendio en una estación de trabajo en el primer nivel del edificio, cerca de la recepción.

El cuadro anexado a este documento detalla el análisis del riesgo realizado, en el cual se observan factores del incendio como el nivel de ocurrencia, la fuente de ignición, la respuesta y el tipo de escenario aplicable.

4.5. Selección de escenarios

El análisis del riesgo, incluido como anexo, detalló los tipos de escenario presentes en la estructura, el único escenario no contemplado fue el número 4, este advierte de la consideración de un incendio en un espacio oculto donde el sistema de alarma y supresión no lo puedan alcanzar, como por ejemplo un cielo raso, se determinó que la única forma que ocurra es, si ocurre un incendio en la instalación eléctrica, ya que se corrobora es uno de los equipos presentes en el cielo, sin embargo esto fue descartado debido a las suposición de que el edificio es nuevo y cuenta con documentos que certifican a la instalación como ignífuga.

El mismo criterio fue utilizado para descartar el escenario número 8, que advierte de un incendio en el cual los sistemas de detección y supresión se encuentren fuera de servicio, se consideró que el sistema de detección y supresión funcionaria de acuerdo a lo esperado.

Se consideraron los escenarios 2, 5, 6, 7, pero no fueron tomados en cuenta debido a que su probabilidad de ocurrencia según la estadística del BCBCR fue baja, además las curvas de incendio en muchos de los casos no pudieron ser acezadas y con por ello no se pudo determinar el tiempo en el cual el HRR máximo fue alcanzado, esto debido que la fuente de consulta NCFS, publico las tasas de HRR, pero cuando se consultó la fuente no se encontró por que el enlace fue borrado.

El siguiente cuadro muestra un extracto del análisis del riesgo del Análisis de riesgo, en específico el primer nivel.

*Cuadro 3. Resumen de escenarios, primer nivel, edificio administrativo
(Los Autores, 2018)*

Nivel	¿Qué pasa si...	Probabilidad	HRR [kW]	Tiempo [s]	Escenario NFPA 101
1	Hay un incendio en el comedor?	Baja	10	596	1
	Hay un incendio ultra rápido (stand de regalos de alguna feria realizada por la facultad) cerca de los medios de egreso?	Baja	1752	desconocido	2
	Hay un incendio en la bodega de los conserjes?	Baja	1600	desconocido	3
	Hay un incendio en la bodega de almacenaje?	Baja	1600	desconocido	3
	Hay un incendio en el cuarto eléctrico?	Baja	no se conoce	desconocido	5
	Hay un incendio en la estación de trabajo de la bodega de archivos del primer nivel de la facultad de ingeniería?	Baja	1600	desconocido	6

Hay un incendio en la estación de trabajo en la secretaría del primer nivel de la facultad de ingeniería?	Baja	1440	1000	1
Hay un incendio en la estación de trabajo en la secretaría del primer nivel de la facultad de ingeniería y no sirven los sistemas de detección ni supresión?	Baja	1440	1000	8

Para la selección de los escenarios más críticos tres fueron los factores determinantes:

- El primero se refiere a los criterios de desempeño, mismos que fueron mencionados anteriormente.
- El segundo fue la curva de incendio, ya que esta indica el HRR y el tiempo en el que se alcanza, debido al tipo de análisis se buscó un incendio que afectara los medios de egreso y cuya HRR estuviera disponible para efectos de consulta y validación.
- El tercer factor fue el tiempo de simulación, y debido a que para realizar el análisis se convino alimentar la información tanto del comportamiento del fuego mediante PyroSim® como la de evacuación mediante Pathfinder®, ambos programas demandan tiempo de resolución de sus distintas ecuaciones de control y la graficación de los mismos.

Siguiendo los criterios anteriores el siguiente cuadro muestra el resultado del análisis del riesgo efectuado en el cual solamente tres escenarios fueron los seleccionados.

Cuadro 4. Escenarios críticos seleccionados (Los Autores, 2018)

Localización	Escenario NFPA	HRR (kW)	Área afectada	Código de plano
Hay un incendio en la estación de trabajo en la secretaría del primer nivel de la facultad de ingeniería	1	1440	Bodega archivo activo, secretaría, atención al público, sala de espera.	AA-E-E102
Hay un incendio en el comedor de administrativo del primer nivel de la facultad de ingeniería	1	1148	Oficina RID, taller equipo de cómputo, mantenimiento.	AA-E-E102
Hay un incendio en la asociación de estudiantes del segundo nivel de la facultad de ingeniería	1	3100	Área de estudio.	AA-E-E103

4.6. Escenario final de simulación

Para la selección final del escenario de simulación la directriz fue computar aquel que alcanzara las condiciones descritas por el criterio de NFPA, el cual es descrito por ser un incendio en un área normalmente ocupada y que podría afectar a un gran número de ocupantes. Como se aprecia en el de acuerdo al área afectada, el incendio en la estación de trabajo de la secretaría de la oficina de decanato, es el que determinamos, podría causar mayor daño y tiene más posibilidades de ocurrencia en comparación a los dos restantes.

La clave de la selección fue el dato extraído de la estadística del BCBCR (2018) mostrado en la Figura 1 que sigue ya que según la cantidad de incendios que anualmente atienden, la mayoría de situaciones fueron provocadas por instalaciones eléctricas en mal estado y equipo electrónico.

Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica
Incendios Investigados por fuente de ignición
157 Incendios investigados al 31 de diciembre del 2017
(En porcentajes)

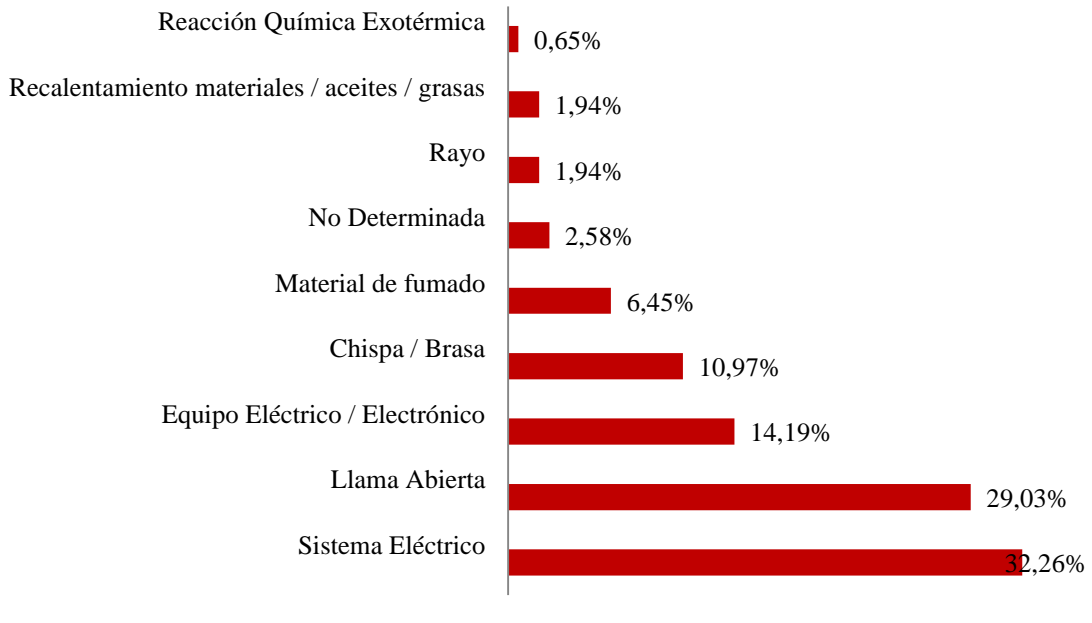


Figura 1. Fuentes de ignición de incendios según BCBCR (BCBCR, 2018)

La Figura 2 indica la zona de modelado para análisis de las condiciones.clave

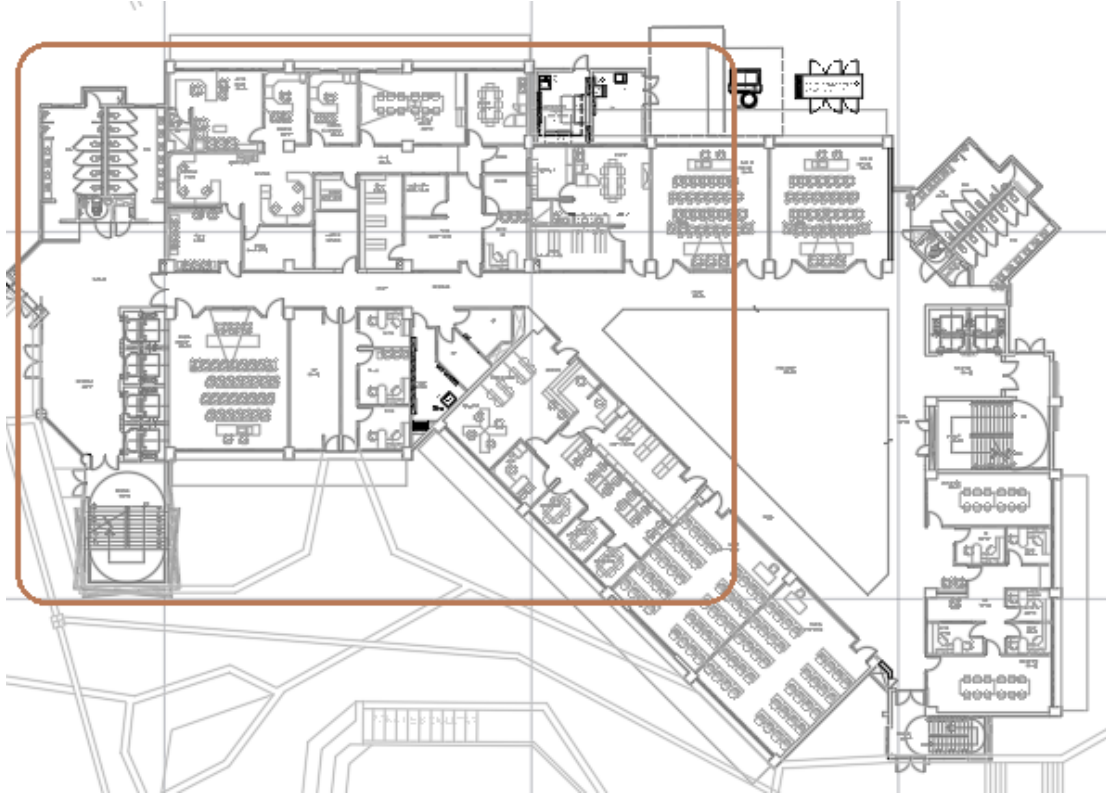


Figura 2. Vista de planta de edificio administrativo, primer nivel, zona de conato y área de modelado. (Los Autores, 2018)