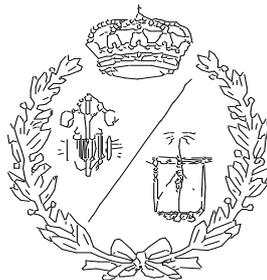


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Máster***

**Aplicación de técnicas avanzadas de  
Ingeniería de Seguridad contra Incendios en  
un edificio de uso docente.**

**(Application of advanced techniques of Fire  
Safety Engineering in an educational building)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
INGENIERIA INDUSTRIAL**

**Autor: Miguel Prieto Lastra**

**Febrero - 2020**

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

## ÍNDICE

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.      | Presentación .....   | 13 |
| 2.      | Introducción.....  | 16 |
| 3.      | Alcance .....  | 20 |
| 4.      | Objetivos de Seguridad contra Incendio.....  | 25 |
| 5.      | Requerimientos funcionales .....   | 26 |
| 6.      | Enfoque del análisis de riesgos .....  | 27 |
| 7.      | Criterios de prestaciones .....  | 29 |
| 8.      | Definición del plan de seguridad contra incendios.....   | 31 |
| 8.1.    | Solución prescriptiva según el CTE.....  | 31 |
| 8.1.1.  | Sectorización .....  | 32 |
| 8.1.2.  | Medidas de evacuación .....  | 38 |
| 8.1.3.  | Sistema de control de los humos .....  | 44 |
| 8.2.    | Solución mediante diseño basado en prestaciones.....   | 54 |
| 9.      | Determinar los escenarios de diseño.....   | 56 |
| 9.1.    | Identificación de peligros .....   | 56 |
| 9.2.    | Escenarios de incendio .....   | 56 |
| 9.2.1.  | El papel de los escenarios de incendio de diseño en el diseño de la seguridad en caso de incendio..... | 57 |
| 9.2.2.  | El papel de los incendios de diseño en seguridad en caso de incendio.....                              | 58 |
| 9.2.3.  | Características de los escenarios de incendio.....   | 59 |
| 9.2.4.  | Identificación de los escenarios de incendio .....   | 59 |
| 9.3.    | Diseño de escenarios de comportamiento de ocupantes.....   | 68 |
| 9.3.1.  | Diseño de comportamiento de ocupantes. ....  | 71 |
| 9.3.2.  | Estimación de los tiempos de pre movimiento .....  | 75 |
| 10.     | Selección de métodos de ingeniería .....   | 77 |
| 10.1.   | Modelo de incendio.....  | 77 |
| 10.1.1. | Introducción.....  | 77 |
| 10.1.2. | Geometría y parámetros de entrada .....  | 78 |
| 10.2.   | Modelo de evacuación .....   | 86 |
| 11.     | Evaluación del diseño.....   | 91 |
| 11.1.   | Resultados de la solución prescriptiva .....   | 91 |
| 11.1.1. | Escenario de Incendio 1 – Incendio en el recinto de conserjería. ....                                  | 91 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|  |     |
|--|-----|
| 11.1.2. Escenario de Incendio 2 – Incendio en el aula 20 del segundo piso.....     | 101 |
| 11.2. Resultados de la solución alternativa.....                                   | 107 |
| 11.2.1. Escenario de Incendio 1 – Incendio en el recinto de conserjería. ....      | 107 |
| 11.2.2. Escenario de Incendio 2 – Incendio en el aula 20 de la segunda planta..... | 123 |
| 12. Conclusión.....  | 128 |
| 13. Referencias.....   | 129 |
| ANEXO A – Resultados de la solución CTE .....                                      | 132 |
| A.1. Escenario de incendio 1 .....   | 132 |
| A.2. Escenario de incendio 2 .....   | 139 |
| ANEXO B – Resultados de las soluciones alternativas A y B .....                    | 146 |
| B.1. Escenario de incendio 1 .....   | 146 |
| B.1.1. .... Comportamiento de la solución alternativa A<br>.....                   | 146 |
| B.1.2. .... Resultados de la solución alternativa B<br>.....                       | 153 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Documento CTE. Ref [2].....  | 14 |
| Figura 2 - El proceso de ingeniería de seguridad en caso de incendio. Ref. [1].....   | 17 |
| Figura 3 - Detalle Planta Baja .....  | 21 |
| Figura 4 - Detalle primera planta .....   | 23 |
| Figura 5 - Detalle segunda planta .....   | 24 |
| Figura 6 - Tipos de enfoque de análisis de riesgo. Ref. [1]. .....  | 27 |
| Figura 7 - Sectorización planta baja .....  | 33 |
| Figura 8 - Sectorización primera planta .....   | 33 |
| Figura 9 - Sectorización segunda planta .....   | 34 |
| Figura 10 - Detalle fachada. Ref. [3].....  | 36 |
| Figura 11 - Detalle Separación entre sector 1 y 2 .....   | 36 |
| Figura 12 - Detalle separación entre sector 2 y 3 .....   | 37 |
| Figura 13 - Ejemplo cálculo de recorridos de evacuación.....  | 39 |
| Figura 14 – Colocación Exutorios.....   | 50 |
| Figura 15 - Detalle cortina de humos.....   | 53 |
| Figura 16 – Planta baja de la solución alternativa .....  | 55 |
| Figura 17 – cubierta de la solución alternativa.....  | 55 |
| Figura 18 - Incendio de diseño en un puesto de trabajo de oficina. Ref. [11].....   | 63 |
| Figura 19 - Curvas para distintos tipos de incendios de diseño. Ref. [10] Anexo C.....  | 64 |
| Figura 20 - Idealización del flujo debajo de un techo. Ref. [12] .....  | 65 |
| Figura 21 - Diagrama simplificado de los procesos en RSET en comparación con el ASET. Ref [17]....  | 72 |
| Figura 22 - Representación de distribuciones de tiempos de pre-movimiento y efectos de los<br>distintos niveles de gestión de seguridad. Ref [17] Anexo E. .... | 76 |
| Figura 23 - Mallado del vestíbulo.....  | 79 |
| Figura 24 - Mallado de la zona de aulas.....  | 80 |
| Figura 25 - Detalle de los exutorios .....  | 81 |
| Figura 26 - Detalle de colocación de burners .....  | 83 |
| Figura 27 – Vista en planta de planos Slice.....  | 84 |
| Figura 28 - Devices Planta Baja .....   | 85 |
| Figura 29- Devices Primera planta .....   | 85 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|   |     |
|---|-----|
| Figura 30 - Devices Segunda Planta .....  | 85  |
| Figura 31 - detalles de devices en escaleras .....  | 86  |
| Figura 32- Representación en Pathfinder del Modelo de la solución prescriptiva.....                   | 88  |
| Figura 33 - Representación en Pathfinder del Modelo de la solución basada en prestaciones.....        | 88  |
| Figura 34 - Evolución del humo en el edificio. Solución CTE, caso 1. ....                             | 92  |
| Figura 35- Visibilidad en slice x=1.25. CTE, caso 1. ....   | 93  |
| Figura 36 - Visibilidad en slice x=4.25. CTE, caso 1. ....  | 93  |
| Figura 37 – Visibilidad en slice X=8. CTE, caso 1. ....   | 93  |
| Figura 38 - Visibilidad en slice x=10. CTE, caso 1. ....  | 93  |
| Figura 39 - Visibilidad en planta 2. CTE, caso 1.....   | 94  |
| Figura 40 - Visibilidad en planta 1. CTE, caso 1.....   | 94  |
| Figura 41- Visibilidad en la planta baja. CTE, caso 1. ....   | 94  |
| Figura 42 - Visibilidad en escaleras. CTE, caso 1. ....   | 94  |
| Figura 43 - Tiempos de evacuación de la solución CTE, caso 1.....                                     | 95  |
| Figura 44- Evacuación planta 2. CTE, caso 1. ....   | 96  |
| Figura 45- evacuación Planta 1. CTE, caso 1. ....   | 96  |
| Figura 46 - Evacuación en planta baja. CTE, caso 1. ....  | 96  |
| Figura 47 – Evac. del 2º al 1º. CTE, caso 1.....  | 96  |
| Figura 48 - Evac. del 1º a la planta baja. CTE, caso 1. ....  | 96  |
| Figura 49 - Comparativa evac. frente a visibilidad en planta baja. CTE, caso 1.....                   | 97  |
| Figura 50 - Comparativa evac. frente a visibilidad en primera planta. CTE, caso 1.....                | 98  |
| Figura 51 - Comparativa evac. frente a visibilidad en planta baja. CTE, caso 1.....                   | 98  |
| Figura 52 - comparativa evac. frente a visibilidad en escaleras del 2º al 1º. CTE, caso 1.....        | 99  |
| Figura 53 - Comparativa evac. frente a visibilidad en escaleras del 1º a la planta baja. CTE, caso 1. | 100 |
| Figura 54 - evolución del humo en el edificio. CTE, caso 2.....                                       | 101 |
| Figura 55 - Visibilidad en slice x=1.25. CTE, caso 2. ....  | 102 |
| Figura 56 - Visibilidad en slice x=4.25. CTE, caso 2. ....  | 102 |
| Figura 57 - Visibilidad en slice x=8. CTE, caso 2. ....   | 102 |
| Figura 58 - Visibilidad en slice x=10. CTE, caso 2. ....  | 102 |
| Figura 59 - Visibilidad en la segunda planta. Solución CTE, caso 2.....                               | 103 |
| Figura 60 - Tiempos de evacuación de la solución CTE, caso 2.....                                     | 103 |
| Figura 61 - Evacuación en planta 2. CTE, caso 2. ....   | 104 |
| Figura 62 - Evacuación en planta 1. CTE, caso 2. ....   | 104 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|  |     |
|--|-----|
| Figura 63 - Evacuación en planta baja. CTE, caso 2. ....   | 104 |
| Figura 64 - Evac. del 2º al 1º. CTE, caso 2. ....  | 105 |
| Figura 65 - Evac. del 1º a planta baja. CTE, caso 2. ....  | 105 |
| Figura 66 - Comparativa Evac. frente a visibilidad en la segunda planta. CTE, caso 2. ....                           | 105 |
| Figura 67 - Evolución del humo en el edificio. Solución Alternativa A, caso 1. ....                                  | 107 |
| Figura 68 - Visibilidad en slice $x=1.25$ . Altern. A, caso 1. ....  | 108 |
| Figura 69 - Visibilidad en slice $x=4.25$ . Altern. A, caso 1. ....  | 108 |
| Figura 70 - Visibilidad en slice $x=8$ . Altern. A, caso 1. ....   | 108 |
| Figura 71- Visibilidad en slice $x=10$ . Altern. A, caso 1. ....   | 108 |
| Figura 72 - Visibilidad en planta 2. Altern. A, caso 1. ....   | 109 |
| Figura 73 - Visibilidad en planta 1. Altern. A, caso 1. ....   | 109 |
| Figura 74 - Visibilidad en planta baja. Altern. A, caso 1. ....  | 109 |
| Figura 75 - Visibilidad en escaleras. Altern. A, caso 1. ....  | 109 |
| Figura 76 - Tiempos de evacuación de la solución Alternativa A, Caso 1. ....   | 110 |
| Figura 77 - Evac Planta 2. Alternativa A, caso 1. ....   | 110 |
| Figura 78 - Evac Planta 1. Alternativa A, caso 1. ....   | 110 |
| Figura 79 - Evac. del 2º al 1º. Altern. A, caso 1. ....  | 111 |
| Figura 79 - Evacuación Planta Baja. Alternativa A, caso 1. ....  | 111 |
| Figura 81 - Evac. del 1º a Planta Baja. Altern. A, caso 1. ....  | 111 |
| Figura 82 - Comparativa Evac. frente a visibilidad en la segunda planta. Alternativa A, caso 1. ....                 | 112 |
| Figura 83 - Comparativa evac. frente a visibilidad en la primera planta. Alternativa A, caso 1. ....                 | 113 |
| Figura 84 - Comparativa evac. frente a visibilidad en la planta baja. Alternativa A, Caso 1. ....                    | 113 |
| Figura 85 - Comparativa evac. frente a visibilidad en escaleras del 2º al 1º. Alternativa A, Caso 1. ....            | 114 |
| Figura 86 - Comparativa evac. frente a visibilidad en escaleras del 1º a la planta baja. Alternativa A, Caso 1. .... | 115 |
| Figura 87 - Evolución del humo en el edificio. Alternativa B, Caso 1. ....   | 116 |
| Figura 88 - Visibilidad en slice $x=1.25$ . Altern. B, caso 1. ....  | 117 |
| Figura 89 - Visibilidad en slice $x=4.25$ . Altern. B, caso 1. ....  | 117 |
| Figura 90 - Visibilidad en slice $x=8$ . Altern. B, caso 1. ....   | 117 |
| Figura 91 - Visibilidad en slice $x=10$ . Altern. B, caso 1. ....  | 117 |
| Figura 92- Visibilidad en la planta 2. Altern. B caso 1. ....  | 118 |
| Figura 93 - Visibilidad en la planta 1. Altern. B caso 1. ....   | 118 |
| Figura 94 - Visibilidad en las escaleras. Alternativa B, Caso 1. ....  | 118 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|  |     |
|--|-----|
| Figura 95 – Tiempos de evacuación en la solución alternativa B, caso 1. ....                           | 119 |
| Figura 96 - Evac. Planta 2. Alternativa B, caso 1 .....  | 119 |
| Figura 97 - Evac. Planta 1. Alternativa B, caso 1. ....  | 119 |
| Figura 98 - Evacuación planta baja. Alternativa B, Caso 1. ....  | 120 |
| Figura 99 - Evac. 2º a 1º. Alternativa B, caso 1. ....   | 120 |
| Figura 100 – Evac. 1º a planta baja. Alternativa B, caso 1. ....                                       | 120 |
| Figura 101 - Comparativa evac. frente a visibilidad en la segunda planta. Alternativa B, caso 1. ....  | 121 |
| Figura 102 - Comparativa evac. frente a visibilidad en la primera planta. Alternativa B, caso 1 .....  | 121 |
| Figura 103 - Comparativa evac. frente a visibilidad en escaleras del 2º al 1º. Alternativa B, caso 1 . | 122 |
| Figura 104 - Tiempos de evacuación de la solución alternativa A, caso 2. ....                          | 123 |
| Figura 105 – Evac. planta 2. Alternativa A, Caso 2. ....   | 124 |
| Figura 106 – Evac. planta 1. Alternativa A, Caso 2. ....   | 124 |
| Figura 107 - Evacuación Planta Baja. Alternativa A, Caso 2. ....                                       | 124 |
| Figura 108 - Evac. 2º a 1º. Alternativa A, Caso 2. ....  | 125 |
| Figura 109 - Evac. 1º a Planta Baja. Alternativa A, Caso 2. ....                                       | 125 |
| Figura 110 - Tiempos de evacuación de la solución alternativa B, Caso 2. ....                          | 126 |
| Figura 111 - Evac. Planta 2. Alternativa B, caso 2. ....   | 127 |
| Figura 112 - Evac. Planta 1. Alternativa B, caso 2. ....   | 127 |
| Figura 113 - Evacuación de la planta baja. Alternativa B, Caso 2. ....                                 | 127 |
| Figura 114 – Evac. 2º a 1º. Alternativa B, Caso 2. ....  | 127 |
| Figura 115 – Evac. 1º a Planta Baja. Alternativa B, Caso 2. ....                                       | 127 |
| Figura 116 – Temp. en Slice x= 1.25. CTE,Caso 1 .....  | 132 |
| Figura 117 – Temp. en Slice x= 4.25. CTE,Caso 1 .....  | 132 |
| Figura 118 – Temp. en Slice x= 8. CTE,Caso 1 .....   | 132 |
| Figura 119 – Temp. en Slice x= 10. CTE,Caso 1 .....  | 132 |
| Figura 120 – Temperatura en Planta 2. CTE, Caso 1. ....  | 133 |
| Figura 121 – Temperatura en Planta 1. CTE, Caso 1. ....  | 133 |
| Figura 122 – Temp. en Planta baja. CTE, Caso 1. ....   | 133 |
| Figura 123 – Temp. en escaleras. CTE, Caso 1. ....   | 133 |
| Figura 124 – Oxígeno en Planta 2. CTE, Caso 1. ....  | 134 |
| Figura 125 – Oxígeno en Planta 1. CTE, Caso 1. ....  | 134 |
| Figura 126 – Oxígeno en Planta baja. CTE, Caso 1. ....   | 134 |
| Figura 127 – Oxígeno en escaleras. CTE, Caso 1. ....   | 134 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|  |     |
|--|-----|
| Figura 128 - CO. en Slice x= 1.25. CTE,Caso 1 .....              | 135 |
| Figura 129 – CO final en Slice x=4.25. CTE, Caso 1.....          | 135 |
| Figura 130 – CO final en Slice x=8. CTE, Caso 1.....             | 135 |
| Figura 131 – CO final en Slice x=10. CTE, Caso 1.....            | 135 |
| Figura 132 – CO en Planta 2. CTE, Caso 1. ....                   | 135 |
| Figura 133 – CO en Planta 1. CTE, Caso 1. ....                   | 135 |
| Figura 134 – CO en Planta baja. CTE, Caso 1.....                 | 136 |
| Figura 135 – CO en escaleras. CTE, Caso 1.....                   | 136 |
| Figura 136 – CO <sub>2</sub> . en Slice x= 1.25. CTE,Caso 1..... | 136 |
| Figura 137 – CO <sub>2</sub> . en Slice x= 4.25. CTE,Caso 1..... | 136 |
| Figura 138 – CO <sub>2</sub> . en Slice x= 8. CTE,Caso 1.....    | 137 |
| Figura 139 – CO <sub>2</sub> . en Slice x= 10. CTE,Caso 1.....   | 137 |
| Figura 140 – CO <sub>2</sub> en Planta 2. CTE, Caso 1. ....      | 137 |
| Figura 141 – CO <sub>2</sub> en Planta 1. CTE, Caso 1. ....      | 137 |
| Figura 142 – CO <sub>2</sub> en Planta baja. CTE, Caso 1.....    | 138 |
| Figura 143 – CO <sub>2</sub> en escaleras. CTE, Caso 1.....      | 138 |
| Figura 144 – Radiación en Planta 2. CTE, Caso 1. ....            | 138 |
| Figura 145 – Radiación en Planta 1. CTE, Caso 1. ....            | 138 |
| Figura 146 – Radiación en Planta baja. CTE, Caso 1.....          | 138 |
| Figura 147 – Radiación en escaleras. CTE, Caso 1.....            | 138 |
| Figura 148 – Temp. en Slice x= 1.25. CTE,Caso 2 .....            | 139 |
| Figura 149 – Temp. en Slice x= 4.25. CTE,Caso 2 .....            | 139 |
| Figura 150 – Temp. final en Slice x= 8. CTE,Caso 2 .....         | 139 |
| Figura 151 – Temp. final en Slice x= 10. CTE,Caso 2 .....        | 139 |
| Figura 152 – Temp en Planta 2. CTE, Caso 2. ....                 | 140 |
| Figura 153 – Temp en Planta 1. CTE, Caso 2.....                  | 140 |
| Figura 154 – Temp en Planta baja. CTE, Caso 2. ....              | 140 |
| Figura 155 – Temp en escaleras. CTE, Caso 2. ....                | 140 |
| Figura 159 – Oxígeno en Planta 2. CTE, Caso 2.....               | 141 |
| Figura 157 – Oxígeno en Planta 1. CTE, Caso 2.....               | 141 |
| Figura 158 – Oxígeno en Planta baja. CTE, Caso 2.....            | 141 |
| Figura 159 – Oxígeno en escaleras. CTE, Caso 2.....              | 141 |
| Figura 160 – CO en Slice x= 1.25. CTE,Caso 2.....                | 142 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|   |     |
|---|-----|
| Figura 161 - CO en Slice x= 4.25. CTE,Caso 2 .....              | 142 |
| Figura 162 - CO final en Slice x= 8. CTE,Caso 2 .....           | 142 |
| Figura 163 - CO final en Slice x= 10. CTE,Caso 2 .....          | 142 |
| Figura 164 – CO en Planta 2. CTE, Caso 2.....                   | 142 |
| Figura 165 – CO en Planta 1. CTE, Caso 2. ....                  | 142 |
| Figura 166 – CO en Planta baja. CTE, Caso 2.....                | 143 |
| Figura 167 – CO en Escaleras. CTE, Caso 2.....                  | 143 |
| Figura 168 – CO2 en Slice x= 1.25. CTE,Caso 2.....              | 143 |
| Figura 169 – CO2 en Slice x= 4.25. CTE,Caso 2.....              | 143 |
| Figura 170 – CO2 final en Slice x= 8. CTE,Caso 2.....           | 143 |
| Figura 171 - CO2 final en Slice x= 10. CTE,Caso 2 .....         | 143 |
| Figura 172 – CO2 en Planta 2. CTE, Caso 2. ....                 | 144 |
| Figura 173 – CO2 en Planta 1. CTE, Caso 2. ....                 | 144 |
| Figura 174 – CO2 en Planta Baja. CTE, Caso 2.....               | 144 |
| Figura 175 – CO2 en Escaleras. CTE, Caso 2.....                 | 144 |
| Figura 176 – Radiación en Planta 2. CTE, Caso 2. ....           | 145 |
| Figura 177 – Radiación en Planta 1. CTE, Caso 2. ....           | 145 |
| Figura 178 – Radiación en Planta baja. CTE, Caso 2.....         | 145 |
| Figura 179 – Radiación en escaleras. CTE, Caso 2.....           | 145 |
| Figura 180 – Temp en Slice x= 1.25. Alternativa A, Caso 1 ..... | 146 |
| Figura 181 – Temp en Slice x= 4.25. Alternativa A, Caso 1 ..... | 146 |
| Figura 182 – Temp en Slice x= 8. Alternativa A, Caso 1 .....    | 146 |
| Figura 183 – Temp en Slice x= 10. Alternativa A, Caso 1 .....   | 146 |
| Figura 184 – Temp. en Planta 2. Alternativa A, Caso 1.....      | 147 |
| Figura 185 – Temp. en Planta 1. Alternativa A, Caso 1.....      | 147 |
| Figura 186 – Temp. en Planta baja. Alternativa A, Caso 1.....   | 147 |
| Figura 187 – Temp. en escaleras. Alternativa A, Caso 1. ....    | 147 |
| Figura 188 – O2 en Planta 2. Alternativa A, Caso 1. ....        | 148 |
| Figura 189 – O2 en Planta 1. Alternativa A, Caso 1. ....        | 148 |
| Figura 190 – O2 en Planta baja. Alternativa A, Caso 1.....      | 148 |
| Figura 191 – O2 en escaleras. Alternativa A, Caso 1.....        | 148 |
| Figura 192 – CO en Slice x= 1.25. Alternativa A, Caso 1.....    | 149 |
| Figura 193 – CO en Slice x= 4.25. Alternativa A, Caso 1.....    | 149 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|  |     |
|--|-----|
| Figura 194 – CO final en Slice $x= 8$ . Alternativa A, Caso 1.....           | 149 |
| Figura 195 – CO final en Slice $x= 10$ . Alternativa A, Caso 1.....          | 149 |
| Figura 196 – CO en Planta 2. Alternativa A, Caso 1. ....                     | 149 |
| Figura 197 – CO en Planta 1. Alternativa A, Caso 1 .....                     | 149 |
| Figura 198 – CO en Planta baja. Alternativa A, Caso 1.....                   | 150 |
| Figura 199 – CO en escaleras. Alternativa A, Caso 1.....                     | 150 |
| Figura 200 – CO <sub>2</sub> en Slice $x= 1.25$ . Alternativa A, Caso 1..... | 150 |
| Figura 201 – CO en Slice $x= 4.25$ . Alternativa A, Caso 1.....              | 150 |
| Figura 202 – CO en Slice $x= 8$ . Alternativa A, Caso 1.....                 | 150 |
| Figura 203 – CO en Slice $x= 10$ . Alternativa A, Caso 1.....                | 150 |
| Figura 204 – CO <sub>2</sub> en Planta 2. Alternativa A, Caso 1 .....        | 151 |
| Figura 205 – CO en Planta 2. Alternativa A, Caso 1 .....                     | 151 |
| Figura 206 – CO en Planta baja. Alternativa A, Caso 1.....                   | 151 |
| Figura 207 – CO en escaleras. Alternativa A, Caso 1.....                     | 151 |
| Figura 208 – Radiación en Planta 2. Alternativa A, Caso 1 .....              | 152 |
| Figura 209 – Radiación en Planta 1. Alternativa A, Caso 1 .....              | 152 |
| Figura 210 – Radiación en Planta baja. Alternativa A, Caso 1.....            | 152 |
| Figura 211 – Radiación en escaleras. Alternativa A, Caso 1.....              | 152 |
| Figura 212 – Temp. en Slice $x= 1.25$ . Alternativa B, Caso 1 .....          | 153 |
| Figura 213 – Temp. en Slice $x= 4.25$ . Alternativa B, Caso 1 .....          | 153 |
| Figura 214 – Temp. en Slice $x= 8$ . Alternativa B, Caso 1 .....             | 153 |
| Figura 215 – Temp. en Slice $x= 10$ . Alternativa B, Caso 1 .....            | 153 |
| Figura 216 – Temp. en Planta 2. Alternativa B, Caso 1 .....                  | 154 |
| Figura 217 – Temp. en Planta 1. Alternativa B, Caso 1 .....                  | 154 |
| Figura 218 – Temp. en Planta baja. Alternativa B, Caso 1 .....               | 154 |
| Figura 219 – Temp. en Escaleras. Alternativa B, Caso 1 .....                 | 154 |
| Figura 220 – Temperaturas de los rociadores. Alternativa B, Caso 1 .....     | 155 |
| Figura 221 – O <sub>2</sub> en Planta 2. Alternativa B, Caso 1.....          | 156 |
| Figura 222 – O <sub>2</sub> en Planta 1. Alternativa B, Caso 1.....          | 156 |
| Figura 223 – O <sub>2</sub> en Planta baja. Alternativa B, Caso 1.....       | 156 |
| Figura 224 – O <sub>2</sub> en escaleras. Alternativa B, Caso 1.....         | 156 |
| Figura 225 – CO en Slice $x= 1.25$ . Alternativa B, Caso 1.....              | 156 |
| Figura 226 – CO final en Slice $x= 4.25$ . Alternativa B, Caso 1.....        | 156 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|  |     |
|--|-----|
| Figura 227 – CO final en Slice x= 8. Alternativa B, Caso 1 .....                 | 156 |
| Figura 228 – CO final en Slice x= 10. Alternativa B, Caso 1 .....                | 156 |
| Figura 229 – CO en Planta 2. Alternativa B, Caso 1 .....                         | 156 |
| Figura 230 – CO en Planta 1. Alternativa B, Caso 1 .....                         | 156 |
| Figura 231 – CO en Planta baja. Alternativa B, Caso 1 .....                      | 156 |
| Figura 232 – CO en escaleras. Alternativa B, Caso 1 .....                        | 156 |
| Figura 233 – CO <sub>2</sub> en Slice x= 1.25. Alternativa B, Caso 1 .....       | 156 |
| Figura 234 – CO <sub>2</sub> Final en Slice x= 4.25. Alternativa B, Caso 1 ..... | 156 |
| Figura 235 – CO <sub>2</sub> Final en Slice x= 8. Alternativa B, Caso 1 .....    | 156 |
| Figura 236 – CO <sub>2</sub> Final en Slice x= 10. Alternativa B, Caso 1 .....   | 156 |
| Figura 237 – CO <sub>2</sub> en Planta 2. Alternativa B, Caso 1 .....            | 156 |
| Figura 238 – CO <sub>2</sub> en Planta 1. Alternativa B, Caso 1 .....            | 156 |
| Figura 239 – CO <sub>2</sub> en Planta baja. Alternativa B, Caso 1 .....         | 156 |
| Figura 240 – CO <sub>2</sub> en escaleras. Alternativa B, Caso 1 .....           | 156 |
| Figura 241 – Radiación en Planta 2. Alternativa B, Caso 1 .....                  | 156 |
| Figura 242 – Radiación en Planta 1. Alternativa B, Caso 1 .....                  | 156 |
| Figura 243 – Radiación en Planta baja. Alternativa B, Caso 1 .....               | 156 |
| Figura 244 – Radiación en Escaleras. Alternativa B, Caso 1 .....                 | 156 |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA  
INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

## INDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1 - Ocupación por planta .....  | 38  |
| Tabla 2 - Recorridos de evacuación en planta baja.....                                      | 40  |
| Tabla 3 - Recorridos de evacuación en primera planta.....                                   | 40  |
| Tabla 4 - Recorridos de evacuación en segunda planta.....                                   | 41  |
| Tabla 5 - Dimensionado de puertas .....   | 43  |
| Tabla 5 - Velocidades de desplazamiento en llano. Ref. [14]. .....                          | 70  |
| Tabla 6 -Velocidades de desplazamiento en escaleras. Ref. [14] .....                        | 70  |
| Tabla 8 – Casos de comportamiento y tipos de ocupación. Ref. [17] Anexo D .....             | 74  |
| Tabla 9 - Propiedades de materiales del modelo.....   | 81  |
| Tabla 10 - Conductividad del ladrillo.....  | 82  |
| Tabla 11- Valores de HRR.....   | 82  |
| Tabla 12 - Valores de HRR para incendio controlado por rociadores .....                     | 83  |
| Tabla 11 - Reparto de perfiles de ocupantes .....   | 89  |
| Tabla 12 - Tiempos de evacuación, RSET mín y RSET máx de solución CTE, caso 1.....          | 95  |
| Tabla 13 - Tiempos de evac. RSET mín y RSET máx de la solución CTE, caso 2.....             | 104 |
| Tabla 14 - Tiempos de evac., RSET mín. y RSET máx. de la solución alternativa A, Caso 1.... | 110 |
| Tabla 15 – Tiempos de evac., RSET mín. y RSET máx. de la solución alternativa B, caso 1. .. | 119 |
| Tabla 16 - Tiempos de evac., RSET mín. y RSET máx de la solución Alternativa A, caso 2..... | 124 |
| Tabla 17 - Tiempos de evac., RSET mín. y RSET máx. de la solución Alternativa B, caso 2.... | 126 |

## 1. PRESENTACIÓN

Las medidas de seguridad contra incendios presentes en las edificaciones se suelen basar esencialmente en los requerimientos recogidos en los diferentes códigos o reglamentos que a nivel nacional se emitían a tal fin. Estos requerimientos tradicionalmente han sido de carácter prescriptivo, indicando soluciones concretas que debían ser implementadas sin tomar en consideración ningún aspecto adicional. Sin embargo, desde hace años nuevos enfoques ingenieriles se han venido permitiendo dentro de dichos códigos, denominándose habitualmente con diseño basado en prestaciones o simplemente ingeniería de seguridad contra incendios. En estos nuevos enfoques la clave está en que se empleen métodos de cálculos científicamente fundamentados para determinar el nivel de seguridad alcanzado.

El presente proyecto consiste en desarrollar un ejemplo de la aplicación de la ingeniería de seguridad contra incendio (ISCI), a través de las técnicas de protección contra incendios basadas en un enfoque prestacional, a un edificio dedicado a un uso educativo. Este ejemplo fue definido como caso de estudio en el subcomité español de normalización AEN CTN23 SC8 Ingeniería de Seguridad contra Incendios, proponiéndose el reto de mostrar en una edificación compleja cómo podría desarrollarse la aplicación de la principal normativa internacional vinculada a la ingeniería de seguridad contra incendios ISO 23932-1 Fire Safety Engineering – General Principles [1].

Como se ha mencionado, hasta hace unos pocos años, las medidas de protección contra incendios a instalar en una edificación han seguido un enfoque de carácter prescriptivo, es decir, se han basado en lo que se indicaba en los códigos de edificación nacionales. Sin embargo, en los países más avanzados, se vienen aplicando enfoques alternativos basados en alcanzar objetivos de seguridad y demostrando que se cumplen esos objetivos a través del uso de herramientas avanzadas. En España, el Código Técnico de la Edificación [2], en su documento básico de Seguridad en caso de Incendio [3], permite el empleo de estos enfoques de diseño basados en prestaciones, en los que las medidas de protección contra incendios deben ser evaluadas cuantitativamente empleando técnicas avanzadas de cálculo, debiéndose emplear un enfoque comparativo para evaluar que los niveles de Seguridad contra Incendios que ofrece la solución alternativa son, al menos, equivalentes a los de la solución prescriptiva.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.



Ministerio de Fomento  
Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda  
Secretaría General de Vivienda  
Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo

# CTE

## Parte I

|            |  |
|------------|--|
| Capítulo 1 | Disposiciones generales                  |
| Capítulo 2 | Condiciones técnicas y administrativas   |
| Capítulo 3 | Exigencias básicas                       |
| ANEJO I    | Contenido del proyecto                   |
| ANEJO II   | Documentación del seguimiento de la obra |
| ANEJO III  | Terminología                             |

20 diciembre 2019

**FIGURA 1 - DOCUMENTO CTE. REF [2]**

Ésto viene recogido en el Artículo 5.1.3 de dicho documento, que indica lo siguiente:

*“Para justificar que un edificio cumple las exigencias básicas que se establecen en el CTE podrá optarse por soluciones alternativas, entendidas como aquéllas que se aparten total o parcialmente de los DB. El proyectista o el director de obra pueden, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a los que se obtendrían por la aplicación de los DB.”*

Como alumno del Máster de Ingeniería Industrial, se me presentó la oportunidad de realizar este proyecto. Ha supuesto un reto personal para mí, ya que he tenido que formarme en una disciplina de Ingeniería con la que no estaba familiarizado, como es la Ingeniería de Seguridad contra Incendios. Para ello, además, ha sido necesario iniciarme en el manejo de los softwares Fire Dynamics Simulator, FDS, y Pathfinder que permiten acometer simulaciones computacionales de los escenarios de incendio y de evacuación de los ocupantes.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Quisiera agradecer la ayuda a mis tutores de proyecto, y al resto de los investigadores del grupo GIDAI que me han ayudado a adentrarme en el mundo de las herramientas computacionales vinculadas con la seguridad contra incendios y a Mariana Llinares Cervera investigadores del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, por su aportación sobre la sectorización del edificio siguiendo las prescripciones del Código Técnico de la Edificación. También quiero agradecer a mi familia por el apoyo que me han dado durante este largo camino en la Escuela.

## 2. INTRODUCCIÓN

La ingeniería de seguridad contra incendios se emplea como apoyo de los diseños de seguridad contra incendios basados en prestaciones, de forma que puede cuantificarse el nivel de seguridad alcanzado por las soluciones implementadas en el diseño. El proceso de ingeniería de seguridad contra incendios debe iniciarse en las etapas más tempranas de un proyecto (que puede incluir, por ejemplo, diseños estructurales, de ventilación, instalaciones eléctricas, etc), tanto para el caso de un edificio de nueva construcción, para la modificación o restauración de un edificio ya existente, o para la evaluación del cumplimiento de las regulaciones actualizadas. Esta disciplina debe estar completamente integrada con otras especialidades de ingeniería a lo largo de todo el proyecto. Esto es necesario cuando se considera que medidas tomadas en otras áreas pueden introducir problemas inintencionados en la seguridad contra incendios.

En España, con la entrada del Código Técnico de la Edificación [2], se abrió la posibilidad de presentar soluciones de diseño alternativas a las medidas prescriptivas definidas en el Documento Básico Seguridad en caso de Incendios [3] para la edificación civil o en el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales para el caso de edificación industrial, siempre que sea demostrado un nivel de prestaciones equivalente. Sin embargo, no ha sido desarrollada a nivel nacional ninguna guía metodológica para definir cómo ejecutar este proceso de diseño basado en prestaciones.

Internacionalmente se dispone de diversas referencias metodológicas, pero cabe destacar que los estándares desarrollados por el subcomité internacional ISO TC92 SC4 son considerados como la guía esencial para desarrollar trabajos de ingeniería de seguridad contra incendios.

La Figura 2 muestra el esquema o diagrama de flujo de la metodología a emplear en el proceso de ingeniería de seguridad contra incendios para una edificación, y que está recogida en la norma ISO 23932-1 [1]. Esta metodología de trabajo es iterativa, hasta que compruebe que las medidas satisfacen el objetivo de seguridad planteado. Al emplear esta metodología, el diseñador debe responder a las preguntas clave planteadas en el mismo en los puntos de decisión. Las respuestas a dichas preguntas pueden requerir que los pasos del proceso se

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

repitan. Este procedimiento se ilustra mediante los puntos de decisión (rombos) y los bucles iterativos asociados (flechas Sí / No).

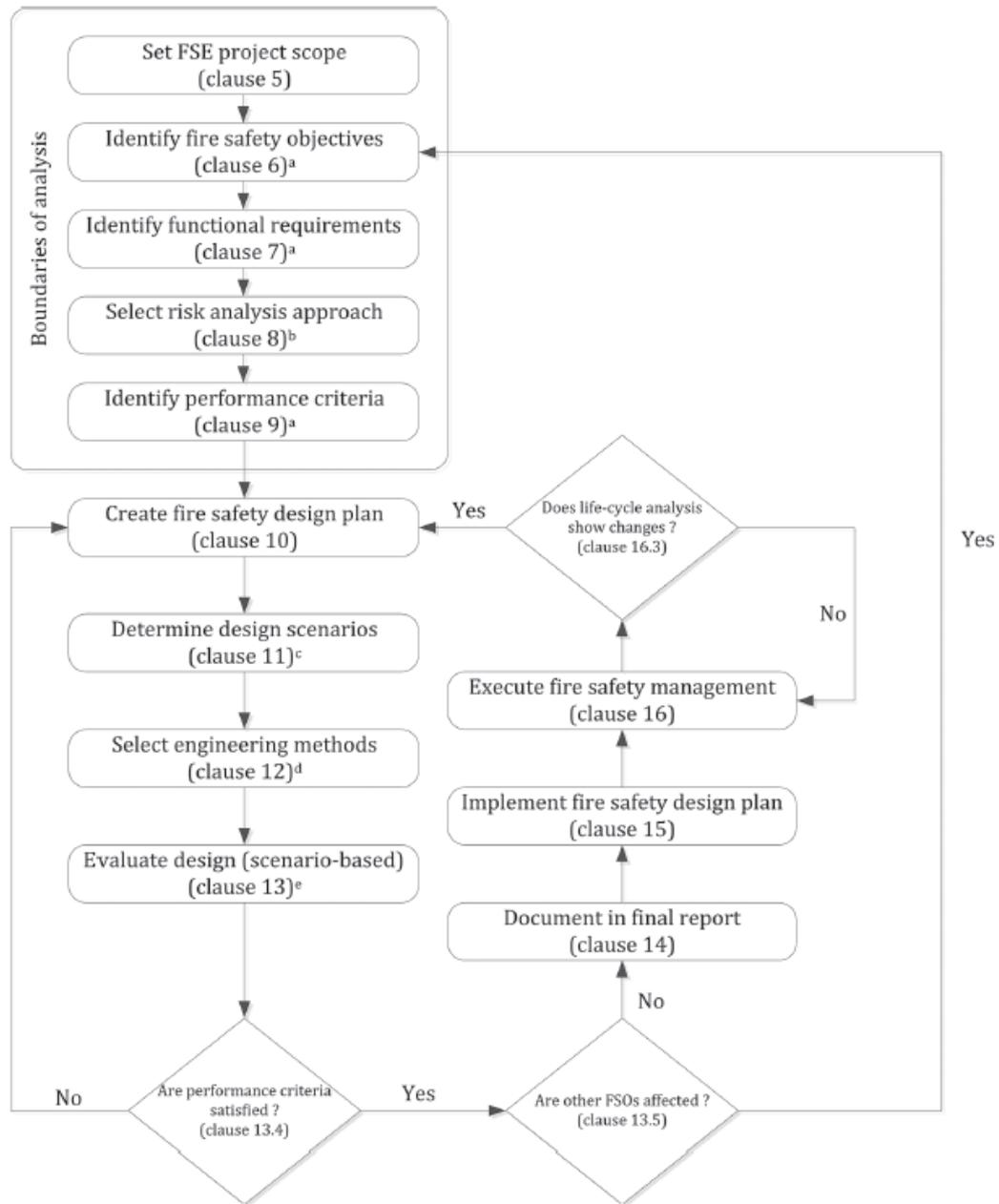


FIGURA 2 - EL PROCESO DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO. REF. [1]

En la primera parte del proceso se deben establecer los límites del análisis. Primero se debe documentar el alcance general del proyecto, incluyendo si es un nuevo edificio, una renovación, o una expansión..., para a continuación definir el alcance de la ingeniería de

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

seguridad contra incendio dentro del contexto del proyecto global. Debe contener información relevante como las características del edificio, o factores ambientales, pero también una clara definición de qué debe ser analizado.

En los siguientes pasos, se deben identificar los objetivos de seguridad y los requerimientos funcionales, seguido de la elección del método de análisis de riesgo, y la identificación de los criterios de prestaciones, que dependen del tipo de análisis escogido.

La identificación de los objetivos de seguridad (FSO), los requerimientos funcionales (FR) y los criterios de prestaciones (PC), es una parte esencial del proceso de ingeniería de seguridad contra incendios. Los objetivos describen los resultados deseados ante un posible incendio, p.e identifican lo que es esencial proteger. Deben ser claramente definidos, según cuáles deben ser alcanzados por el análisis de seguridad contra incendios, y cuáles deben ser cumplidos por las medidas prescriptivas indicadas en la normativa. Los requerimientos funcionales, traducen los objetivos en funcionalidades requeridas por el diseño del sistema de protección contra incendios. Finalmente, los requerimientos funcionales se cuantifican en forma de criterios de prestaciones, que se usan para determinar si los objetivos de seguridad han sido alcanzados, según el método de análisis de riesgo escogido. Un objetivo de seguridad puede ser representado por uno o más requerimientos funcionales, y a su vez, un requerimiento funcional se puede cuantificar por uno o más criterios de prestaciones.

Después de establecer los límites del análisis, se creará un plan de diseño de seguridad contra incendios inicial que será evaluado mediante casos de diseño y métodos de ingeniería. La evaluación se llevará a cabo en relación a los criterios de prestaciones identificados. Si éstos se cumplen, el diseño se considera que ha cumplido los objetivos, y si no se cumplen se deberá revisar el diseño. Hay que tener en cuenta que existe más de un diseño que puede cumplir con los objetivos.

En este documento se va a seguir el esquema indicado en la figura 2. Primero se comenzará estableciendo el alcance del proyecto, presentando el edificio que servirá de caso de estudio y que será la base sobre la que se diseñarán las distintas soluciones propuestas. Después, el resto de los elementos que definen los límites del análisis, empezando por el objetivo de seguridad contra incendios principal, y los requerimientos funcionales que se deben alcanzar para que se cumpla. Se expondrá el análisis de riesgo de tipo comparativo que ha sido escogido para determinar si estos objetivos son alcanzados, y se enumerarán los criterios de

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

prestaciones, que serán las magnitudes que midan las distintas manifestaciones del incendio. En estos criterios se establecerán unos valores límite de sostenibilidad, que determinarán el nivel de seguridad del edificio. Con esto quedan definidos los límites del análisis.

A continuación, se presentarán las soluciones propuestas, comenzando por la solución prescriptiva, siguiendo las indicaciones del Documento Básico de Seguridad contra Incendios [3] del Código Técnico de la Edificación [2], que servirá de referencia para el análisis comparativo, y después la solución alternativa, basada en prestaciones.

En el apartado 9 se explicarán los escenarios de incendio, y los escenarios de comportamiento de ocupantes. Los escenarios de diseño de incendio detallan las condiciones y características del incendio que serán utilizados para poner a prueba las soluciones propuestas en el apartado 8, y así analizar la evolución de las manifestaciones del incendio en el edificio. Los escenarios de comportamiento de ocupantes, a su vez, recogen las condiciones en las que se va a llevar a cabo la evacuación, como son el tipo de ocupación presente en el edificio, su familiarización con el entorno, velocidades de desplazamiento, así como otras condiciones relacionadas con el propio edificio como tipo de alarma presente, que, en conjunto, serán determinantes para el tiempo total de evacuación.

En el apartado 10 se van a presentar los modelos por ordenador elaborados para realizar las distintas simulaciones. Primero se mostrará el modelo para realizar las simulaciones de incendio, creado mediante el software Fire Dynamics Simulator (FDS) y su interfaz gráfica Pyrosim, y después el modelo para las simulaciones de evacuación, creado mediante el software Pathfinder.

Por último, se expondrán los resultados obtenidos. Se empezará por los resultados de la solución prescriptiva basada en el CTE, que establecerá los niveles de seguridad de referencia. Después se mostrarán los resultados de las soluciones alternativas, primero analizando el comportamiento inicial del edificio sin mejoras, que se denominará Solución Alternativa A, y, por último, el comportamiento con las mejoras propuestas por la solución basada en prestaciones, que se denominará Solución Alternativa B. En esta sección de resultados se mostrarán solo los que sean relevantes para la evaluación de seguridad por superar o estar cerca de los límites de sostenibilidad. El resto de resultados quedan recogidos en los Anexos A y B.

### 3. ALCANCE

El presente proyecto analiza un edificio de uso docente que, por algún motivo, p.ej. por ser de nueva construcción o por ser un edificio existente que se ve sometido a algún tipo de modificación, debe acometerse el diseño de las medidas de seguridad contra incendios en el mismo. El objetivo del proyecto es evaluar el nivel de seguridad alcanzado por una solución alternativa a las medidas prescriptivas establecidas por la normativa de aplicación, Documento Básico Seguridad en caso de Incendio [3]. Para la realización de este trabajo debe señalarse que me he basado en la geometría de un edificio existente en el que se han realizado diversas modificaciones constructivas. A continuación, realizaremos una descripción del edificio objeto del trabajo.

El edificio a estudiar está dividido en dos áreas: el vestíbulo principal en el lado Oeste, y una larga zona de aulas, que cuenta con planta baja, planta primera y planta segunda, en la zona Este. El vestíbulo principal es un espacio al que se accede desde el exterior a través de una entrada, con cuatro puertas al exterior, y tres puertas al interior, de 0,95 metros de anchura cada una. Es un espacio abierto, de 18,5 metros de altura hasta la cubierta del edificio.

En la figura 3 se puede ver la configuración de la planta baja del edificio. El vestíbulo se conecta por esta planta con la zona de aulas, con dos pasillos que rodean el recinto de conserjería. En cada uno de estos pasillos, se pueden acceder a dos zonas de aseos, al norte y al sur del recinto mencionado. La altura hasta el techo en esta zona de paso es de 3,4 metros.

En la zona de aulas, encontramos otro espacio abierto, de 16,1 metros de altura, que llega hasta la cubierta a modo de atrio. En la planta baja se encuentra el pasillo central que recorre todo el espacio de norte a sur. Este pasillo está conectado con la zona de conserjería, y se encuentran los accesos a las aulas. Hay un total de diez aulas en la planta baja, numeradas desde el aula 1 en el extremo norte, hasta las aulas 9A y 9B en el extremo sur. El resto de las aulas se encuentran en el lado este del pasillo. La altura de estas aulas, como en el recinto de conserjería, es de 3,4 metros hasta el forjado de la primera planta. También se encuentra un ascensor, en la zona suroeste, en frente del aula 8, que llega hasta la segunda planta. En frente de la zona de conserjería, cruzando el pasillo, se encuentra otra salida al exterior, formada por tres puertas, una central de 1,20 metros de anchura, y dos laterales de 1 metro de anchura cada una. En el lado oeste del pasillo se encuentran dos escaleras, de 1,90 metros de anchura. Una al norte de la salida anterior, y otra al sur, que permiten acceder desde la planta baja a la

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

primera, y a la segunda. En los espacios libres que quedan debajo de las escaleras, en la planta baja, se encuentran cuatro pequeños recintos usados de almacén, dos debajo de la escalera norte, y dos debajo de la sur.

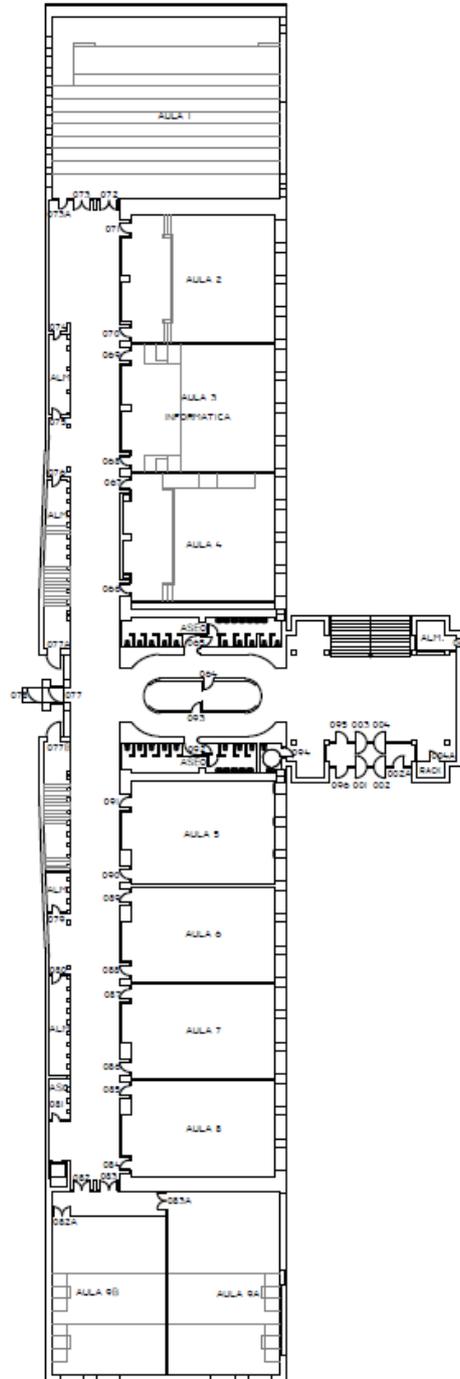
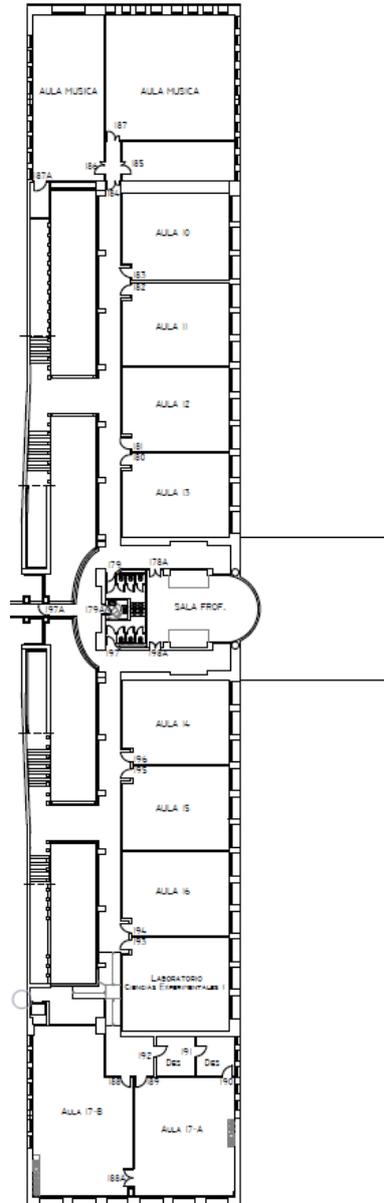


FIGURA 3 - DETALLE PLANTA BAJA

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

La primera planta se encuentra a 4,4 metros sobre el nivel del suelo, y está representada en la figura 4. Encima de las aulas hay otro pasillo que recorre toda la planta de norte a sur, el cual cuenta con dos pasarelas para cruzar a cada una de las escaleras anteriores por encima del pasillo de la planta baja, de 3,30 metros de ancho. En el extremo norte hay dos aulas de música, y un pequeño almacén, y en el extremo sur, las aulas 17A y 17B, y dos despachos. El resto de las aulas se encuentran colocadas como en la planta baja: en la zona norte, del aula 10 al aula 13, y en la zona sur, del aula 14 a la 16 más el laboratorio de ciencias experimentales I. En la zona central del pasillo, encima del recinto de conserjería, se encuentra la sala de profesores, junto a dos zonas de aseos. Tanto las aulas como la sala de profesores y los aseos cuentan con una altura de 3,4 metros hasta el forjado del segundo piso. La anchura del pasillo se encuentra limitada a 1,40 metros por una serie de pilares de hormigón repartidos en toda su longitud, que llegan hasta la cubierta del edificio. La altura desde este pasillo hasta la cubierta es de 7,9 metros.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

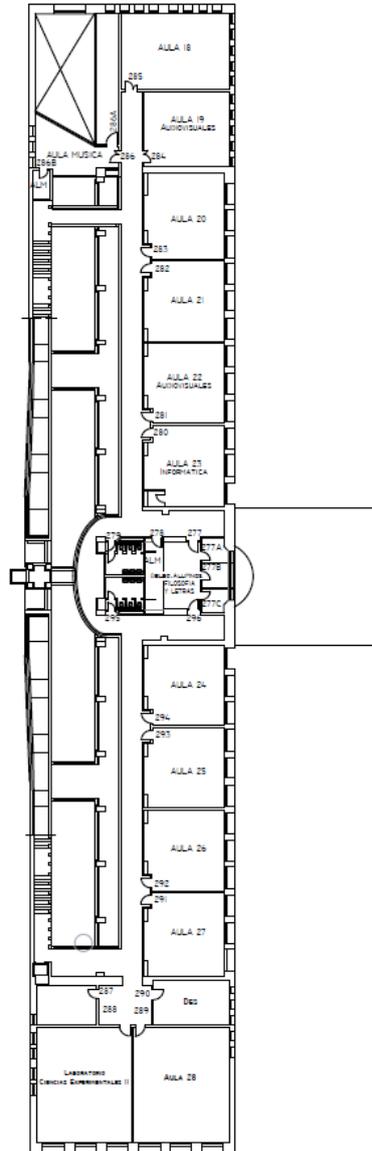


**FIGURA 4 - DETALLE PRIMERA PLANTA**

La segunda planta se encuentra a 8,8 metros de altura sobre el nivel del suelo. Encima de las aulas del primer piso, se encuentra el último pasillo, de 1,80 metros de anchura. Al igual, cuenta con dos pasarelas para acceder a ambas escaleras, localizadas próximas a los extremos norte y sur del pasillo. El acceso norte es de 1,35 metros de anchura, y el sur de 2,75 metros. En el extremo norte se encuentran el aula de música, y las aulas 18 y 19, esta última de audiovisuales; y en el extremo sur, el aula 28, el laboratorio de ciencias experimentales II, un despacho, y las escaleras de acceso a la cubierta. A lo largo del lado este del pasillo, como en

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

las plantas inferiores, encontramos las aulas 20, 21, 22 de audiovisuales, y 23 de informática en la sección norte; y 24 a 27 en la sección sur. En la zona central del pasillo, se encuentra la delegación de alumnos, y dos zonas de aseos. Todos estos recintos presentan una altura hasta la cubierta de 3,5 metros de altura.



**FIGURA 5 - DETALLE SEGUNDA PLANTA**

En cuanto al entorno que rodea al edificio, no está en contacto directo con otros edificios. Está rodeado en todo su perímetro por tramos de carretera, y cuenta con una zona de parking en la zona sureste del exterior. En frente de la entrada principal hay un espacio al aire libre peatonal, que cuenta con una rampa que conecta la carretera con dicha entrada, y puede

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

ser usada por los servicios de emergencia. No hay por tanto peligros externos debido a otros edificios colindantes. Tampoco hay peligro de desastres naturales en el emplazamiento.

### 4. OBJETIVOS DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIO

Los objetivos de seguridad contra incendio (FSO) pueden ser obligatorios o voluntarios. Los voluntarios se identifican mediante un proceso de discusión, negociación y compromiso que incluye a las partes afectadas, mientras que los objetivos obligatorios se encuentran en códigos o regulaciones y siempre deben ser cumplidos. En este caso, el proyecto se va a centrar en los obligatorios debiéndose de considerar que en España el *Código Técnico de la Edificación* [2] recoge en el artículo 11 que se debe reducir el riesgo de los usuarios a límites aceptables.

El principal objetivo por lo tanto es la seguridad de las vidas los usuarios (FSO1). Es preciso realizar un diseño de seguridad contra incendios tal que permita evitar o minimizar los daños por las manifestaciones directas (temperatura, toxicidad, etc.) e indirectas (opacidad de los humos) de incendios de carácter accidental a los ocupantes del edificio y a las personas que se encuentren en las cercanías del edificio.

No han sido considerados otros posibles objetivos de seguridad de carácter voluntario a efectos de este proyecto. El edificio se encuentra aislado, luego no hay riesgo de propagación a otros edificios colindantes. Las tareas que se llevan en el interior, de uso docente, pueden ser fácilmente interrumpidas y reanudadas, luego el objetivo de continuidad de operaciones no es necesario. No hay espacios naturales, o animales que se puedan ver afectados por un incendio, así que se descarta la protección del entorno. Tampoco es necesario una protección del patrimonio, ya que no hay objetos irremplazables, históricos o de alto valor.

## 5. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

Cada objetivo de seguridad debe ir asociado a uno o más requerimientos funcionales (FR) que deben cumplir el diseño de seguridad contra incendios. Un requerimiento funcional es una declaración de una condición necesaria para alcanzar el objetivo de seguridad. Los medios para conseguir un objetivo son elementos sujetos al control mediante el diseño de seguridad, como la estructura, compartimentación, materiales utilizados en la construcción, o sistemas de protección contra incendios. Mientras los objetivos de seguridad se expresan en términos de resultados no cuantificables, los requerimientos funcionales, aunque aún cualitativos, se aplican al nivel de diseño de elementos y tienen más significado para la ingeniería.

Para conseguir el objetivo FSO1, garantizar la seguridad de las vidas de los ocupantes, se deben seguir los requerimientos funcionales establecidos en el Documento Básico de Seguridad contra Incendios [3], representados por las 6 secciones que lo forman:

- FR1: Propagación interior: Se limitará el riesgo de propagación del incendio por el interior del edificio.
- FR2: Propagación exterior: Se limitará el riesgo de propagación del incendio por el exterior, tanto en el edificio considerado como a otros edificios.
- FR3: Evacuación de ocupantes: El edificio dispondrá de los medios de evacuación adecuados para que los ocupantes puedan abandonarlo o alcanzar un lugar seguro dentro del mismo en condiciones de seguridad.
- FR4: Instalaciones de protección contra incendios: El edificio dispondrá de los equipos e instalaciones adecuados para hacer posible la detección, el control y la extinción del incendio, así como la transmisión de la alarma a los ocupantes.
- FR5: Intervención de bomberos: Se facilitará la intervención de los equipos de rescate y de extinción de incendios.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- FR6: Resistencia al fuego de la estructura: La estructura portante mantendrá su resistencia al fuego durante el tiempo necesario para que puedan cumplirse las anteriores exigencias básicas.

## 6. ENFOQUE DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

Una vez que se han establecido los objetivos de seguridad, y se han definido los consecuentes requerimientos funcionales, se debe decidir el enfoque para el análisis del riesgo de incendio. Una característica común de los análisis de riesgo es una comparación entre riesgo estimado y riesgo tolerable, utilizando algún tipo de medición de riesgo. En la norma ISO 23932-1 [1], se recogen distintos tipos de análisis de riesgo, como se ve en la figura 6. Este apartado corresponde al punto 8 de la figura 2.

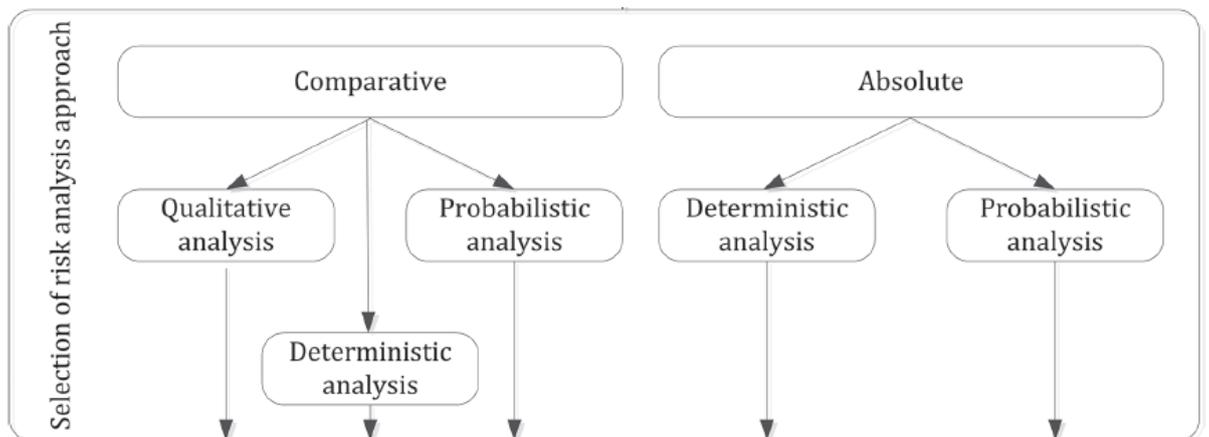


FIGURA 6 - TIPOS DE ENFOQUE DE ANÁLISIS DE RIESGO. REF. [1].

En un análisis comparativo, el riesgo tolerable se deriva de un diseño de referencia para un conjunto de condiciones tolerables. El enfoque de riesgo puede ser cualitativo, determinista o probabilista. Sólo se deben analizar los factores asociados a la desviación, y el resultado es una comparación con la referencia. El análisis de riesgo escogido determina las medidas usadas para la comparación.

En el análisis absoluto, el riesgo se estima, y la tolerabilidad del riesgo se juzga basándose en un nivel definido. Puede ser determinista o probabilista.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

En base a las opciones disponibles, se seleccionó para el presente proyecto un enfoque comparativo, ya que así lo indica el Artículo 5 del CTE [2] anteriormente mencionado, ya que para que la solución alternativa propuesta sea considerada válida, deberá mejorar o al menos igualar los niveles de seguridad de la solución prescriptiva. Por tanto, primero se diseñará una solución prescriptiva basada en el *Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio* [3], que servirá como modelo de referencia para establecer unos niveles de riesgo aceptables, con los que compararemos la solución basada en prestaciones. Para comparar estos niveles de riesgo, se utilizarán los criterios de prestaciones (PC) como métricas, que se verán en el siguiente apartado.

En cuanto al tratamiento de la incertidumbre, se va a seguir un enfoque cuantitativo, y como se verá en el apartado 10 (Métodos de ingeniería), se van a realizar dos modelos de simulación computación para el análisis del diseño: un modelo de simulación computación de la dinámica de fluidos del incendio (CFD), y un modelo de evacuación de los ocupantes.

A la hora de analizar los casos de incendio, debido a que los modelos CFD son de gran complejidad, y elevados tiempos de simulación, se va a escoger un análisis de riesgo de tipo determinista. La complejidad impide analizar un gran número de casos de incendio, así que se escogerán un conjunto de los casos más desfavorables creíbles, que presenten un desafío severo para el diseño.

En cuanto al análisis de riesgo para evaluar los tiempos de evacuación, se va a escoger un enfoque probabilista. Los modelos de evacuación son de una complejidad menor, y es posible lanzar un mayor número de simulaciones, utilizando un muestreo de entrada aleatorio, y posteriormente dar un tratamiento estadístico a los resultados obtenidos.

Para acometer este enfoque, se consideran en este trabajo dos conceptos de la Ingeniería de la Seguridad contra Incendios: el Tiempo Requerido para la Evacuación en condiciones seguras RSET (Required Safe Egress Time) y el Tiempo Disponible para la Evacuación ASET (Available Safe Egress Time) tal y como se indicará de forma detallada en el apartado 9.3.1.

## 7. CRITERIOS DE PRESTACIONES

Los Criterios de Prestaciones son métricas, expresadas en forma determinista o probabilista, que determinan si cada Requerimiento Funcional ha sido cumplido por el diseño del sistema de seguridad contra incendios. Por cada requerimiento funcional habrá uno o más criterios de prestaciones asociados.

La formulación de estos criterios depende del enfoque del análisis de riesgo escogido. Para el enfoque comparativo, debido a que el riesgo tolerable se deriva implícitamente de un diseño de referencia, los criterios de prestaciones deben escogerse de forma que permitan una comparación válida entre la solución y la referencia. Pueden expresarse como estimaciones conservativas, es decir, valores correspondientes a una exposición menor de la crítica, dada una susceptibilidad media; o estimaciones representativas, valores que corresponden a exposiciones críticas dada susceptibilidad media.

Se van a escoger por tanto los criterios de prestaciones para cumplir los requerimientos funcionales (FR) definidos en el DBSI [3]. En este caso, serán valores estimados conservativos, debido a que el tipo de análisis es determinista, y el nivel de incertidumbre no está tratado a un alto nivel. Estos criterios de prestaciones medirán las condiciones ambientales compatibles con la vida y con la capacidad de auto-evacuación de los ocupantes, y deberán mantenerse en todo el dominio, al menos durante la fase de evacuación, para así poder evaluar el requerimiento funcional, y saber si el objetivo de seguridad se cumple. Los criterios de prestaciones para el RF1 son los siguientes, obtenidos de las referencias [4 – 6]:

- Visibilidad (PC1): por regla general, suele ser el parámetro de sostenibilidad más crítico. Con el fin de garantizar la auto-evacuación de los usuarios, la visibilidad de los caminos de evacuación debe ser de 10 m para puertas, paredes y señales no retroiluminadas.
- Temperatura (PC2): aunque se estima que la piel puede aguantar hasta 120 °C y el tracto respiratorio 100 °C (aire húmedo), se ha considerado como límite 70 °C, quedando del lado de la seguridad.
- Concentración de oxígeno (PC3): su valor no puede caer por debajo del 14% ya que se dificultaría la auto-evacuación de las personas.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- Concentración de CO (PC4): durante un periodo de 30 min, el monóxido de carbono no deberá exceder las 800 ppm.
- Concentración de CO<sub>2</sub> (PC5): durante un periodo de 30 min, el dióxido de carbono no puede superar el 5% en volumen (valor de referencia que incapacita a una persona).
- Radiación (PC6): el valor que puede soportar un ser humano es de 2.5 kW/m<sup>2</sup>, que corresponde a una capa de humos a 200 °C.

## **8. DEFINICIÓN DEL PLAN DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS.**

El plan de seguridad contra incendios es la elaboración de la estrategia de seguridad contra incendios para la vida humana en los espacios objeto de análisis y consiste en el conjunto de elementos del sistema de protección contra incendios que se van a colocar para tal fin.

Debido al carácter comparativo del análisis, tal como es exigido por el Código Técnico de la Edificación, primero se va a exponer un plan de seguridad diseñado siguiendo la metodología prescriptiva que se recoge en el Documento Básico Seguridad en caso de Incendio, que aportará unos niveles de seguridad aceptables establecidos por la normativa nacional para realizar la comparación. En segundo lugar, se mostrará la solución alternativa, que no estará sujeta a las regulaciones de la prescriptiva, pero será válida siempre y cuando aporte un nivel de seguridad igual o mayor.

### **8.1. Solución prescriptiva según el CTE.**

La primera estrategia de seguridad a considerar es una solución aplicando la sistemática prescriptiva recogida en el Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio del CTE. Debido a que el presente trabajo se centrará en aportar una solución alternativa para la seguridad de los ocupantes, las secciones del Documento Básico de especial interés para el diseño del plan serán las de propagación interna, y evacuación de los ocupantes, ya que tratan sobre las medidas para evitar una propagación interior, distancias de seguridad, dimensiones de puertas y pasillos, o sistemas de control de humos, es decir, factores que influyen en el desarrollo del incendio, o en la evacuación de los ocupantes. A priori se asumió que el resto de las secciones no son objeto para este análisis ya que tratan sobre equipamiento de seguridad como extintores, bocas de incendio, hidrantes exteriores; o están fuera del alcance del proyecto, como el acceso al entorno del edificio de los servicios de bomberos, o la integridad estructural. Sin embargo, finalmente en la solución alternativa además de las soluciones prescriptivas recogidas en el CTE DB SI, se plantea incluir una medida adicional de protección activa, mediante rociadores automáticos.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Todas aquellas secciones no tratadas en este documento deben ser implementadas en la solución tal como vengan indicadas en el CTE.

### **8.1.1. Sectorización**

Los edificios se deben compartimentar en sectores de incendio según las condiciones que se establecen en la tabla 1.1 del DBSI. Las superficies máximas indicadas en dicha tabla pueden duplicarse cuando el edificio esté protegido con una instalación automática de extinción.

A efectos del cómputo de la superficie de un sector de incendio, se considera que los locales de riesgo especial, las escaleras y pasillos protegidos, los vestíbulos de independencia y las escaleras compartimentadas como sectores que estén contenidos en dicho sector, no forman parte de este.

El presente proyecto se clasifica como un edificio docente, de varias plantas, y la superficie de cada sector de incendio indicada en la tabla no debe exceder 4000 m<sup>2</sup>. La superficie total es de unos 6090 m<sup>2</sup> aproximadamente, por lo que es necesario realizar una compartimentación. En la planta baja, hay cuatro pequeños recintos utilizados como almacenes, que se van a considerar como locales de riesgo especial, y no contabilizarán en la superficie total.

El edificio se va a dividir en tres sectores: el sector 1 al norte de 840 m<sup>2</sup>; el sector 2 en el centro, incluyendo la zona del vestíbulo, de 4000 m<sup>2</sup>; y el sector 3 al sur de 900 m<sup>2</sup>, como se indicará en las figuras 7 a 9. En la planta baja hay seis salidas de planta (figura 8), las salidas S1, S2, S3 y S4 del sector 2, y una salida más en las escaleras interiores de los sectores 1 y 3. En la primera planta (figura 9) hay cuatro salidas de planta, los accesos a las escaleras interiores S1.1 y S1.2 en los sectores 1 y 3 respectivamente, y las escaleras laterales norte y sur que bajan a la primera planta. En la segunda planta (figura 10), como en la primera, hay cuatro salidas de planta: las escaleras S2.1 y S2.2 en los sectores 1 y 3 respectivamente, y las escaleras laterales norte y sur que bajan a la primera planta.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

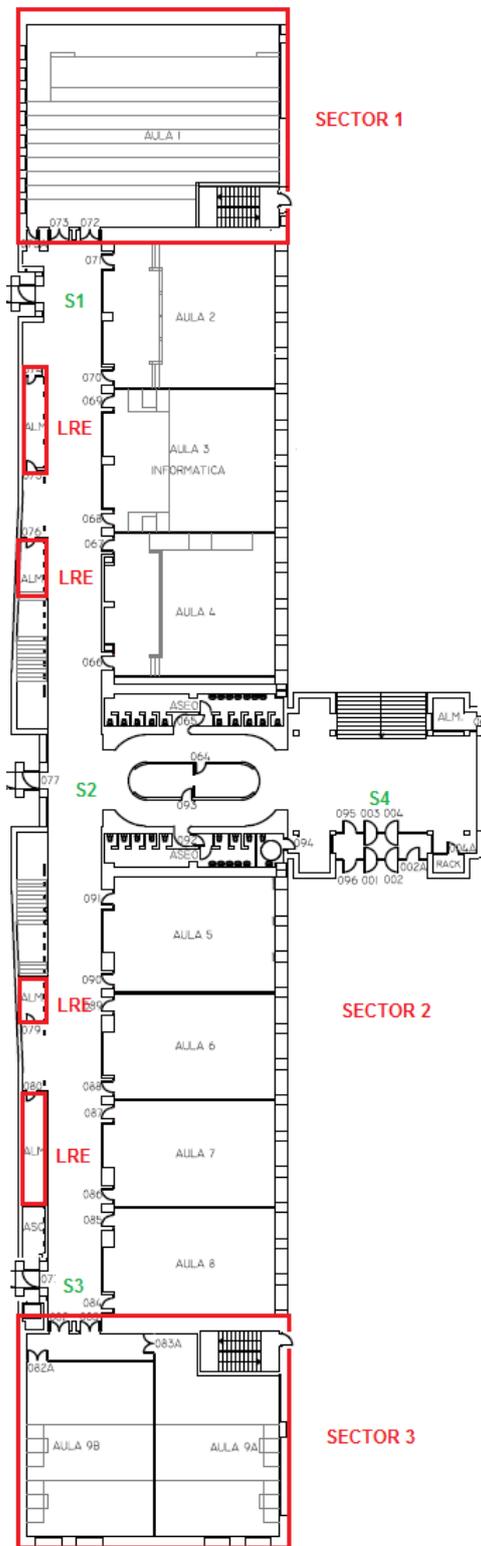


FIGURA 7 - SECTORIZACIÓN PLANTA BAJA

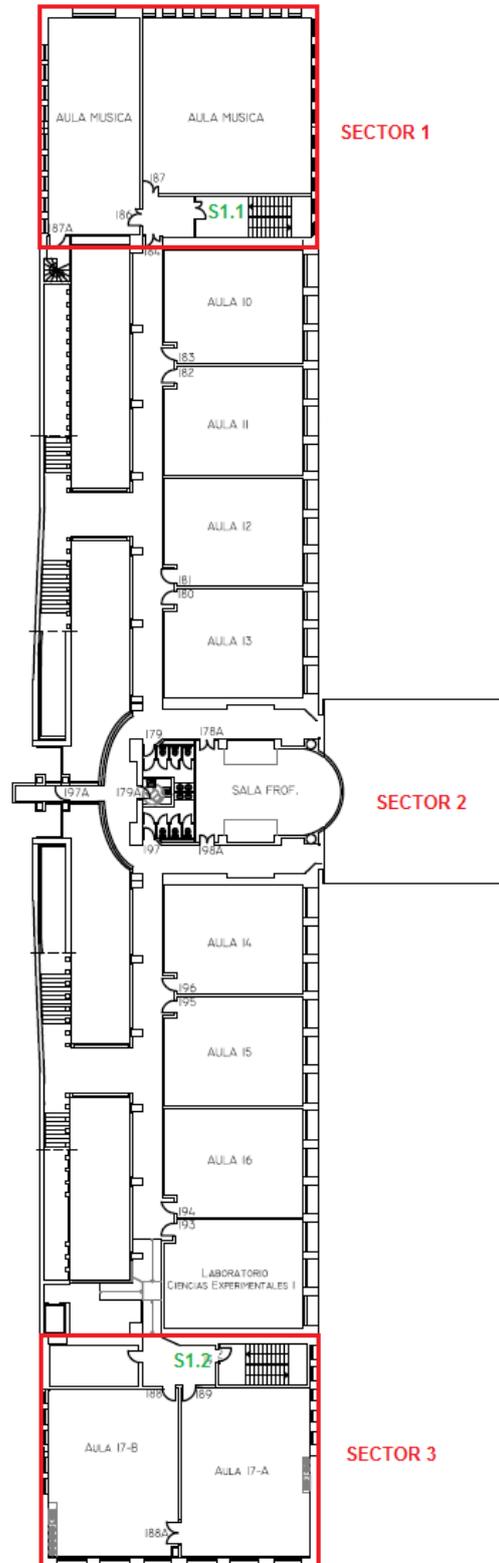


FIGURA 8 - SECTORIZACIÓN PRIMERA PLANTA

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

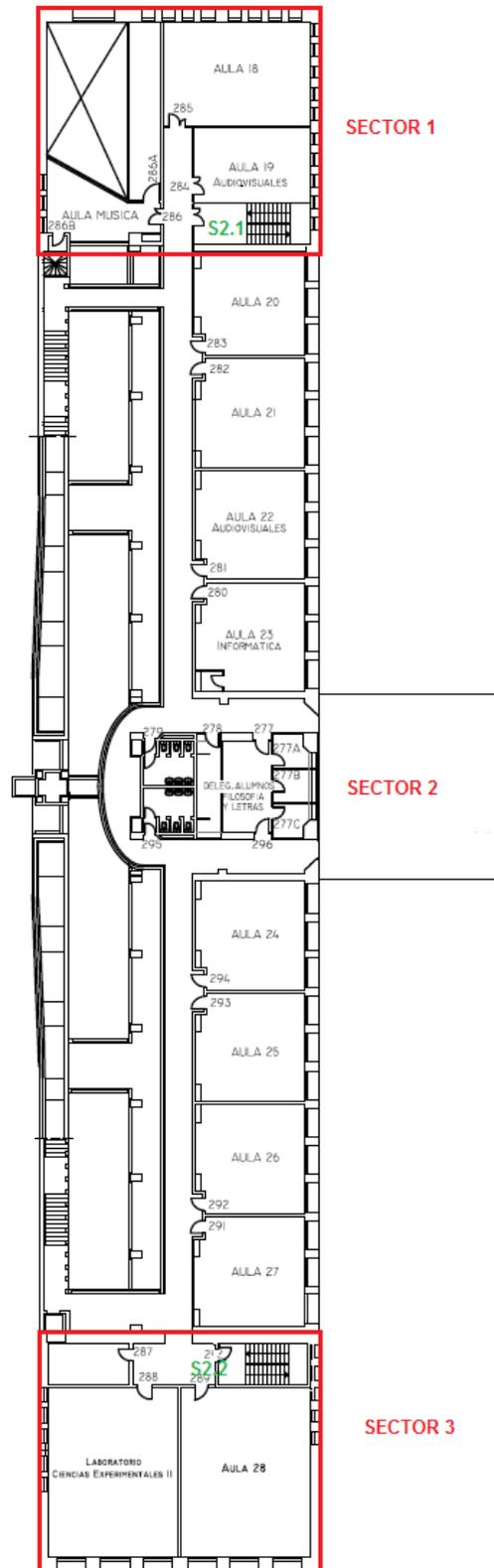


FIGURA 9 - SECTORIZACIÓN SEGUNDA PLANTA

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

La resistencia al fuego de los elementos separadores de los sectores de incendio debe satisfacer las condiciones que se establecen en la tabla 1.2 del DBSI.

Las paredes y techos que separan el sector, por ser de uso Docente, y de altura menos a 15 m, debe ser EI 60. Las puertas de paso entre sectores debe ser EI t-C5, siendo t la mitad del tiempo de resistencia al fuego requerido en la pared en la que se encuentre, luego EI 30-C5.

Los locales y zonas de riesgo especial integrados se clasifican conforme a los grados de riesgo alto, medio y bajo según los criterios de la tabla 2.1. y deben cumplir las condiciones que se establecen en la tabla 2.2, ambas en el DBSI.

Hay 4 locales de riesgo especial en la planta baja de la zona de aulas, debajo de las escaleras laterales. Según la tabla 2.1 se van a clasificar como almacenes de elementos combustibles, de riesgo bajo. Sus características según la tabla 2.2 son:

- Resistencia al fuego de la estructura portante: R 90
- Resistencia al fuego de las paredes y techos que separan la zona del resto del edificio: EI 90
- Puertas de comunicación: EI 45-C5
- Máximo recorrido hasta alguna salida del local: menor o igual a 25m. Todos cumplen esta distancia, los dos locales superiores están a menos de 25 metros de la salida S1 y los dos inferiores, de la salida S3.

Según la tabla 4.1 del documento, los elementos constructivos deben cumplir las siguientes condiciones de reacción al fuego: en zonas ocupables, el revestimiento de techos y paredes debe ser C-s2,d0 y de suelos E<sub>FL</sub>.

Los elementos verticales separadores de otro edificio deben ser al menos EI 120. En este caso, no es necesario cumplir esto ya que no hay edificios colindantes. Con el fin de limitar el riesgo de propagación exterior horizontal del incendio a través de la fachada entre dos sectores de incendio, los puntos de sus fachadas que no sean al menos EI 60 deben estar separados la distancia “d” en proyección horizontal que se indica a continuación, como mínimo, en función del ángulo  $\alpha$ .

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

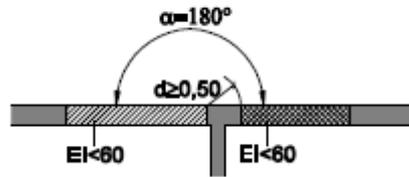


FIGURA 10 - DETALLE FACHADA. REF. [3]

En nuestro caso, tenemos dos puntos en las fachadas noreste y noroeste, en el paso del sector 1 al 2, y otros dos puntos en las fachadas sureste y suroeste, en el paso del sector 2 al 3. Ambos a  $180^\circ$ , que, según la norma, corresponde a una distancia “d” de 0.50 m.

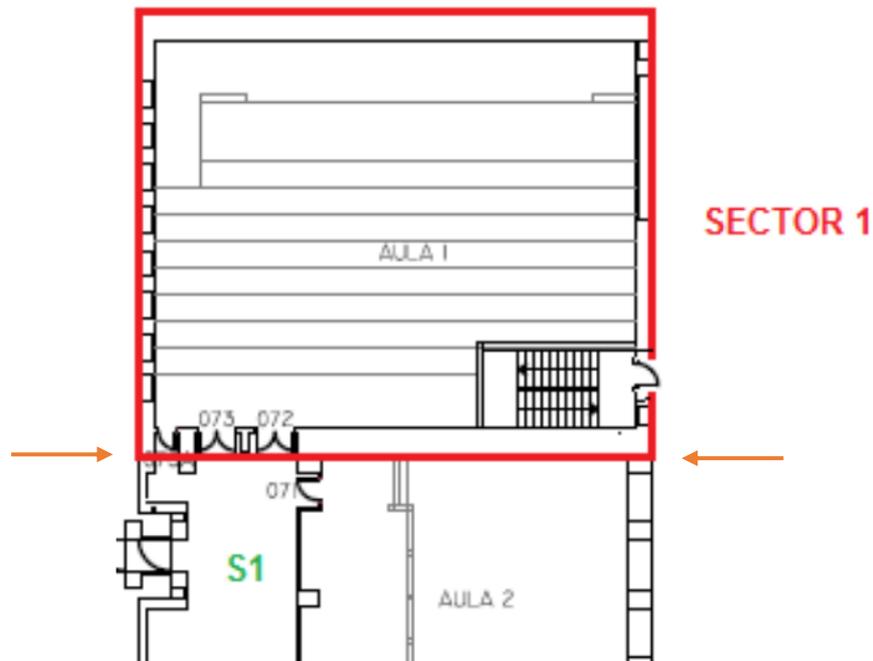


FIGURA 11 - DETALLE SEPARACIÓN ENTRE SECTOR 1 Y 2

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

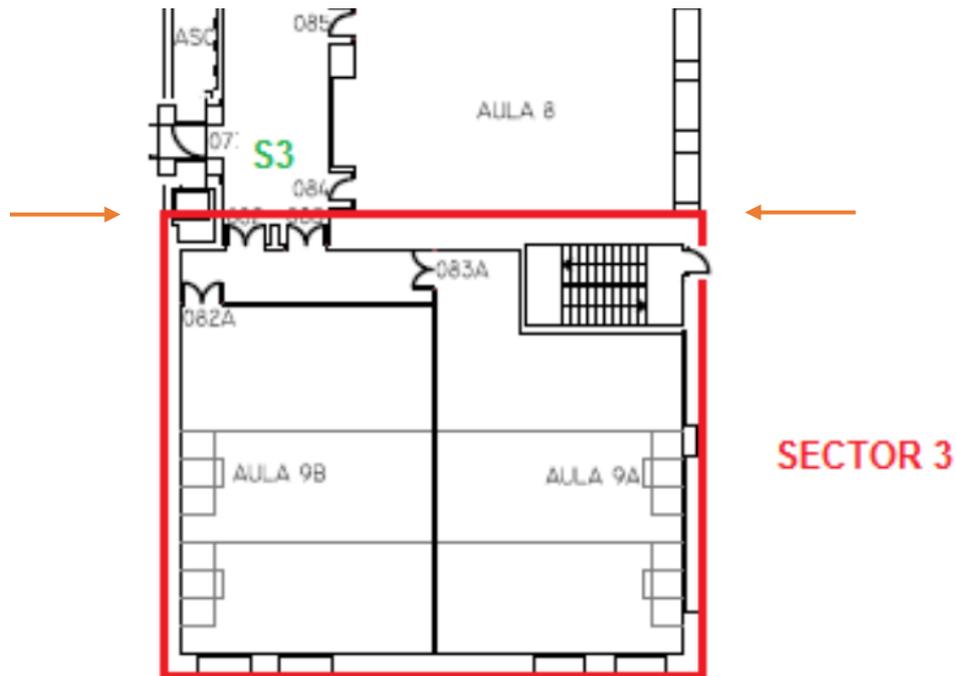


FIGURA 12 - DETALLE SEPARACIÓN ENTRE SECTOR 2 Y 3

Con el fin de limitar el riesgo de propagación vertical del incendio por fachada entre dos sectores de incendio, entre una zona de riesgo especial alto y otras zonas más altas del edificio, dicha fachada debe ser al menos EI 60 en una franja de 1m de altura, como mínimo, medida sobre el plano de la fachada.

Este punto no es de aplicación ya que no hay cambios de sector en el plano vertical, y los locales de riesgo especial son de nivel bajo.

La clase de reacción al fuego de los materiales que ocupen más del 10% de la superficie del acabado exterior de las fachadas, o de las superficies interiores de las cámaras ventiladas que dichas fachadas puedan tener, será B-s3,d2 hasta una altura de 3.5 m como mínimo, en aquellas fachadas cuyo arranque inferior sea accesible al público desde la rasante exterior o desde una cubierta.

Con el fin de limitar el riesgo de propagación exterior del incendio por la cubierta, esta tendrá una resistencia al fuego REI 60 como mínimo, en una franja de 0.50 m de anchura medida desde el edificio colindante, así como en una franja de 1 m de anchura situada sobre el encuentro con la cubierta de todo elemento compartimentador de un sector de incendio o de un local de riesgo especial alto. Como alternativa, puede optarse por prolongar la medianería o el elemento compartimentador 0.60 m por encima del acabado de la cubierta.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

En nuestro caso se ha optado por la segunda opción, y se han prolongado los muros que separan el sector 2 de los 1 y 3 por encima del acabado de la cubierta.

Los materiales que ocupen más del 10% del revestimiento o acabado exterior de las zonas de cubierta situadas a menos de 5 m de distancia de la proyección vertical de cualquier zona de fachada, del mismo o de otro edificio, cuyo saliente exceda de 1m, así como los lucernarios, claraboyas y cualquier otro elemento de iluminación o ventilación, deben pertenecer a la clase de reacción al fuego B<sub>ROOF</sub> (t1).

### 8.1.2. Medidas de evacuación

Para calcular la ocupación deben tomarse los valores de densidad de ocupación de la tabla 2.1 de la sección 3 del DBSI, en función de la superficie útil de cada zona. Para un local de uso Docente tenemos que en el conjunto de la planta se considera una densidad de 10 m<sup>2</sup>/persona. Con lo que tenemos el siguiente reparto de ocupación:

**TABLA 1 - OCUPACIÓN POR PLANTA**

|              | <b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Ocupación (personas)</b> |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Planta baja  | 2500                              | 250                         |
| Planta 1     | 1940                              | 194                         |
| Planta 2     | 1650                              | 165                         |
| <b>TOTAL</b> | 6090                              | 609                         |

La tabla 3.1 del DBSI indica el número de salidas que debe haber en cada caso, como mínimo, así como la longitud de los recorridos de evacuación hasta ellas.

Esto depende del número de salidas existentes de planta o del edificio. Para nuestro uso, todas las plantas disponen de más de una salida de planta o salida de recinto por lo tanto el máximo de la longitud de los recorridos de evacuación hasta alguna salida de planta es de 50 m. Para medir estos caminos, desde cada uno de los recintos de la planta, se va a partir de la esquina del recinto más alejada de la puerta para representar el caso más desfavorable en el que

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

se puede encontrar un ocupante a la hora de iniciar la evacuación, como se indica en la figura ejemplo siguiente:

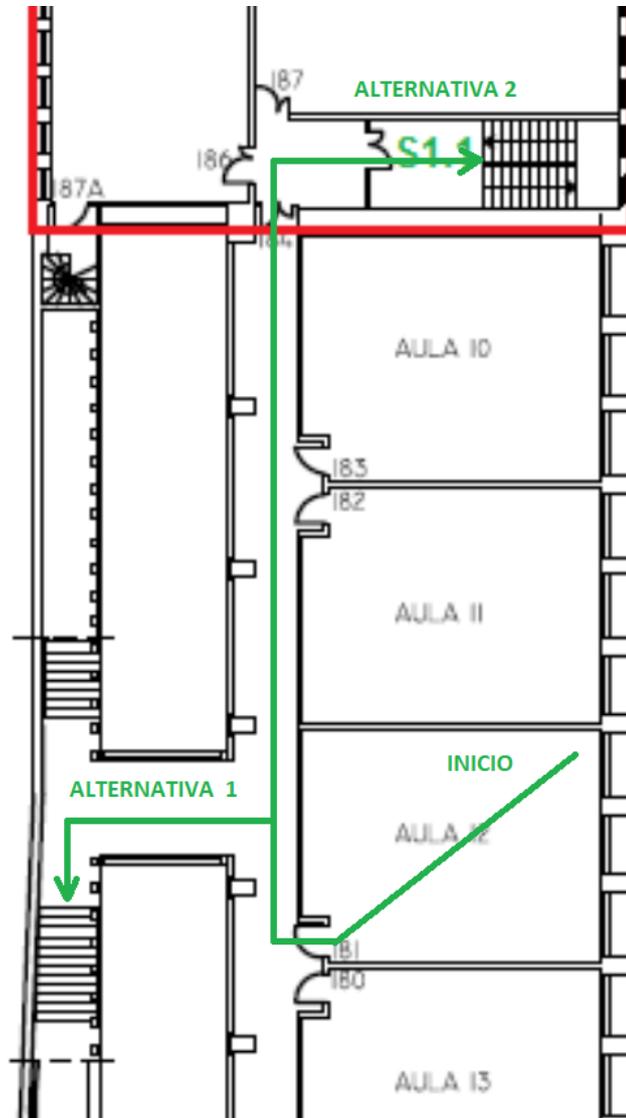


FIGURA 13 - EJEMPLO CÁLCULO DE RECORRIDOS DE EVACUACIÓN

Como se ve en la figura 13, se presentan dos recorridos alternativos de evacuación. El comienzo es en la esquina más alejada de la puerta del aula, y se marcan los recorridos hasta las dos salidas de planta más próximas, la primera en la escalera norte, y la segunda en la S1.1. De esta forma, se procede a analizar los recorridos de evacuación desde todos los recintos del edificio, con sus caminos alternativos si procede, para comprobar que no se superan estos 50 metros. Las distancias se recogen en las tablas siguientes:

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

TABLA 2 - RECORRIDOS DE EVACUACIÓN EN PLANTA BAJA

| <b>Inicio</b>        | <b>Planta</b> | <b>Salida de planta</b> | <b>Longitud (m)</b> |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------------|
| Aula 1               | Baja          | 1                       | 28.8                |
| Aula 2               | Baja          | 1                       | 20.5                |
| Aula 3 (informática) | Baja          | 1                       | 26                  |
| Aula 3 (informática) | Baja          | 2                       | 38.89               |
| Aula 4               | Baja          | 1                       | 37.71               |
| Aula 4               | Baja          | 2                       | 27.42               |
| Aula 5               | Baja          | 2                       | 26.9                |
| Aula 5               | Baja          | 3                       | 42.75               |
| Aula 6               | Baja          | 2                       | 35.5                |
| Aula 6               | Baja          | 3                       | 34                  |
| Aula 7               | Baja          | 2                       | 43                  |
| Aula 7               | Baja          | 3                       | 26                  |
| Aula 8               | Baja          | 3                       | 16.64               |
| Aula 9 A             | Baja          | 3                       | 27                  |
| Aula 9 B             | Baja          | 3                       | 20                  |
| Aseo 065             | Baja          | 2                       | 12                  |
| Aseo 065             | Baja          | 4                       | 15                  |
| Aseo 092             | Baja          | 2                       | 12                  |
| Aseo 092             | Baja          | 4                       | 15                  |
| Conserjería          | Baja          | 2                       | 12                  |
| Conserjería          | Baja          | 4                       | 15                  |

TABLA 3 - RECORRIDOS DE EVACUACIÓN EN PRIMERA PLANTA

| <b>Inicio</b> | <b>Planta</b> | <b>Salida de planta</b> | <b>Longitud (m)</b> |
|---------------|---------------|-------------------------|---------------------|
| Aula 10       | Primera       | Escalera Norte          | 34.3                |
| Aula 10       | Primera       | 1.1                     | 30                  |
| Aula 11       | Primera       | Escalera Norte          | 31.25               |
| Aula 11       | Primera       | 1.1                     | 330                 |
| Aula 12       | Primera       | Escalera Norte          | 26.3                |
| Aula 12       | Primera       | 1.1                     | 46                  |
| Aula 13       | Primera       | Escalera Norte          | 28.8                |
| Aula 13       | Primera       | 1.1                     | 48                  |
| Aula 14       | Primera       | Escalera Sur            | 28                  |
| Aula 14       | Primera       | 1.2                     | 47.8                |
| Aula 15       | Primera       | Escalera Sur            | 26.6                |
| Aula 15       | Primera       | 1.2                     | 45                  |
| Aula 16       | Primera       | Escalera Sur            | 31.7                |
| Aula 16       | Primera       | 1.2                     | 31.3                |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|                                |         |                  |      |
|--------------------------------|---------|------------------|------|
| Aula 17-A                      | Primera | Escalera Sur     | 48.3 |
| Aula 17-A                      | Primera | 1.2              | 16.2 |
| Aula 17-B                      | Primera | Escalera Sur     | 46.2 |
| Aula 17-B                      | Primera | 1.2              | 18.6 |
| Aula Música 1                  | Primera | Escalera Norte   | 46.9 |
| Aula Música 1                  | Primera | 1.1              | 21.8 |
| Aula Música 2                  | Primera | Escalera Norte   | 49   |
| Aula Música 2                  | Primera | 1.1              | 21.8 |
| Sala de Profesores             | Primera | Esc. Norte y Sur | 41.5 |
| Lab. Ciencias Experimentales 1 | Primera | Escalera Sur     | 34.5 |
| Lab. Ciencias Experimentales 1 | Primera | 2.1              | 30   |

TABLA 4 - RECORRIDOS DE EVACUACIÓN EN SEGUNDA PLANTA

| Inicio                | Planta  | Salida de planta | Longitud (m) |
|-----------------------|---------|------------------|--------------|
| Aula 18               | Segunda | Escalera Norte   | 33.7         |
| Aula 18               | Segunda | 2.1              | 19           |
| Aula 19               | Segunda | Escalera Norte   | 30           |
| Aula 19               | Segunda | 2.1              | 15           |
| Aula 20               | Segunda | Escalera Norte   | 25.6         |
| Aula 20               | Segunda | 2.1              | 25.8         |
| Aula 21               | Segunda | Escalera Norte   | 27.5         |
| Aula 21               | Segunda | 2.1              | 28.6         |
| Aula 22               | Segunda | Escalera Norte   | 41.5         |
| Aula 22               | Segunda | 2.1              | 42           |
| Aula 23               | Segunda | Escalera Norte   | 43           |
| Aula 23               | Segunda | 2.1              | 44.5         |
| Aula 24               | Segunda | Escalera Sur     | 47           |
| Aula 24               | Segunda | 2.2              | 43.7         |
| Aula 25               | Segunda | Escalera Sur     | 46.3         |
| Aula 25               | Segunda | 2.2              | 42           |
| Aula 26               | Segunda | Escalera Sur     | 31.5         |
| Aula 26               | Segunda | 2.2              | 28.5         |
| Aula 27               | Segunda | Escalera Sur     | 29.3         |
| Aula 27               | Segunda | 2.2              | 26.5         |
| Aula 28               | Segunda | Escalera Sur     | 16.3         |
| Aula 28               | Segunda | 2.2              | 33.5         |
| Aula Música 2         | Segunda | Escalera Norte   | 26.3         |
| Aula Música 2         | Segunda | 2.1              | 16.3         |
| Delegación de Alumnos | Segunda | 2.1              | 47.7         |
| Delegación de Alumnos | Segunda | 2.2              | 45.7         |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

|                                |         |              |      |
|--------------------------------|---------|--------------|------|
| Lab. Ciencias Experimentales 2 | Segunda | Escalera Sur | 39   |
| Lab. Ciencias Experimentales 2 | Segunda | 2.2          | 18.8 |

Cuando en una zona, en un recinto, en una planta o en el edificio deba existir más de una salida, considerando también como tales los puntos de paso obligado, la distribución de los ocupantes entre ellas a efectos de cálculo debe hacerse suponiendo inutilizada una de ellas, bajo la hipótesis más desfavorable.

A efectos de cálculo de la capacidad de evacuación de las escaleras y de la distribución de los ocupantes entre ellas, cuando existan varias, no es preciso suponer inutilizada en su totalidad alguna de las escaleras protegidas, de las especialmente protegidas o de las compartimentadas como los sectores de incendio, existentes. En cambio, cuando deban existir varias escaleras y estas sean no protegidas o no compartimentadas, debe considerarse inutilizada en su totalidad alguna de ellas, bajo la hipótesis más desfavorable.

En la planta de desembarco de una escalera, el flujo de personas que la utiliza deberá añadirse a la salida de planta que les corresponda, a efectos de determinar la anchura de esta. Dicho flujo deberá estimarse o bien en  $160 \cdot A$  personas, siendo  $A$  la anchura, en metros, del desembarco de la escalera, o bien el número de personas que utiliza la escalera en el conjunto de las plantas, cuando este sea menor que  $160 \cdot A$ .

El dimensionado de los elementos debe realizarse conforme a lo indicado en la tabla 4.1 de la norma:

- Para puertas y pasos, la anchura  $A$  debe ser:

$$A \geq P/200$$

Siendo  $P$  el número de personas que está previsto que pase por el punto a dimensionar. Esta anchura debe ser como mínimo 0.80 metros. El cálculo es el siguiente:

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

**TABLA 5 - DIMENSIONADO DE PUERTAS**

|          | <b>Salidas</b> | <b>Salidas activas</b> | <b>Ocupación</b> | <b>Ocup./salida</b> | <b>Ancho Puertas (m)</b> |
|----------|----------------|------------------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| Planta 2 | 4              | 3                      | 165              | 55                  | 0.28                     |
| Planta 1 | 4              | 3                      | 194              | 64.7                | 0.32                     |

De las cuatro salidas se supone una inutilizada, y como se ve la anchura de las puertas resultante está por debajo del mínimo de 0.80 metros. Las puertas que deben cumplir esta anchura mínima son las que se encuentran en los recorridos de evacuación, que solo son las de acceso a las escaleras interiores de los sectores 1 y 3, que serán de 1 metro de longitud.

- Para pasillos y rampas, la anchura A debe ser:

$$A \geq P/200$$

Luego el cálculo es el mismo que en el caso de las puertas. La norma establece el mínimo aquí en 1 metro, que queda cumplido de sobra, ya que en el segundo piso la anchura es de 2 metros, y en el primer piso, a pesar de las columnas de hormigón que ocupan una parte del pasillo, la anchura es de 1.40 metros.

- Para escaleras no protegidas, la norma indica en la tabla 4.2 las capacidades de evacuación de las escaleras en función de su anchura. Para las escaleras norte y sur de 1.90 metros de anchura, la capacidad en evacuación descendente es de 304 personas, y para las escaleras interiores de los sectores 1 y 3, de anchura 1.70 metros, la capacidad de evacuación descendente es de 272 personas. El total de ocupantes a evacuar por las escaleras, acumulando la primera y segunda planta como se indica, es de 359, repartidos entre 3 escaleras (ya que una se supone inutilizada), resulta en una capacidad de evacuación mínima de cada escalera de 120 ocupantes, lo cual queda satisfecho.

En la tabla 5.1 se indican las condiciones de protección que deben cumplir las escaleras previstas para evacuación. En un edificio de uso docente, si las escaleras no están protegidas, la altura máxima de evacuación permitida es de 14 metros. Puesto que la segunda planta se encuentra a 8.8 metros de altura, se encuentra dentro del límite permitido.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

**8.1.3. Sistema de control de los humos**

Uno de los casos en los que se debe instalar un sistema de control del humo del incendio, capaz de garantizar dicho control durante la evacuación de los ocupantes de forma que ésta se pueda llevar a cabo en condiciones de seguridad, es el de los atrios, cuando su ocupación en el conjunto de las zonas y plantas que constituyan un mismo sector de incendio exceda de 500 personas, o bien cuando esté previsto para ser utilizado para la evacuación de más de 500 personas.

Por tanto, se deberá instalar un Sistema de Control de Temperatura y Evacuación de Humos (SCTEH). Para su diseño, se siguió la norma UNE 23585:2017 [7], a la que se hará referencia a partir de ahora, que indica la metodología de cálculo necesaria.

Como se ha indicado, el propósito del diseño del SCTEH es garantizar la protección de los medios de evacuación, manteniendo los recorridos de evacuación y accesos libres de humos. Para el cálculo, se considera que el penacho inicial por encima del incendio es interceptado por un techo y el humo circula lateralmente antes de derramarse dentro de un espacio adyacente más alto, lo cual conlleva etapas adicionales en el cálculo del movimiento de los humos y del caudal de entrada de aire dentro de los gases de los humos.

Las etapas de cálculo incluyen:

- El incendio: se debe basar en un incendio en situación estable de un tamaño apropiado al edificio
- El penacho por encima del incendio: puede estar combinado con el flujo de los gases del humo saliendo de la habitación.
- El voladizo: cuando sobresale más allá de la abertura de un recinto de incendio, el efecto sobre el flujo y el caudal de los humos en el borde de derrame se debe calcular.
- El derrame del penacho: se debe calcular la mezcla de aire dentro del derrame del penacho de humos. Para aplicaciones de seguridad de las personas, como es nuestro caso, se establecerá la altura de la base de la capa flotante de gases de los humos por encima del camino de evacuación más alto abierto al mismo espacio que el incendio y sus humos.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- Influencias externas: cuando la presión de la capa de humos en un atrio puede reducirse por debajo de la del ambiente, para impedir el movimiento de los humos hacia el interior de los recintos adyacentes a este atrio, se deben calcular los efectos de la presión del viento.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, primero se debe seleccionar el incendio de diseño a partir del cual se va a realizar todo el cálculo. Se deben identificar las posibles situaciones de incendios en el espacio a analizar, y que vienen tipificados en las tablas 1.1 a 1.4 de la norma. Puesto que el recinto en nuestro caso no se ajusta bien a ninguna alternativa de las tablas, se utiliza como referencia la tabla L.3 del anexo L para locales de Pública concurrencia:

$$\text{Área de incendio } (A_f) = \text{toda la superficie} = 9 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro } (P) = \text{Ancho de la abertura} = 12 \text{ m}$$

$$\text{Flujo de calor liberado } (q_f) = 255 \text{ kW/m}^2$$

Con estos datos pasamos al punto 6.3 de la norma para el cálculo de flujos de gases de humos calientes desde un recinto de incendio hacia un espacio adyacente. Primero, de la tabla 3, obtenemos el valor del flujo de calor convectivo en la abertura. De nuevo, debido a que el recinto no se ajusta a la clasificación de la tabla 3, se sigue la recomendación de tomar 0.5 veces el valor del calor emitido:

$$Q_w = 0.5 \cdot (q_f \cdot A_f) = 1147.5 \text{ kW}$$

Según el anexo B se calcula la masa de gases circulantes:

$$M_w = \frac{C_e \cdot P \cdot W \cdot h^{\frac{3}{2}}}{\left[ W^{\frac{2}{3}} + \frac{1}{C_d} \cdot \left( \frac{C_e \cdot P}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}}}$$

Donde:

$W$  es la anchura de la apertura, de 2,5 m;

$h$  es la altura de la abertura por encima del suelo de 3,5 m;

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

$C_d$  es el coeficiente de eficacia de descarga de la abertura, en este caso de valor 1 ya que el humo se aproxima directamente al borde de derrame, sin dintel;

$C_e$  es el coeficiente del caudal entrante para un gran penacho, de valor 0.337, obtenido del Anexo A.1 por ser un recinto de pequeño espacio.

El valor de  $M_w$  obtenido es de 10.34 kg/s.

Se calcula la temperatura de la capa por encima de la del ambiente, tomando  $c=1.012$  kJ/(kg·K), con la ecuación:

$$\theta_w = \frac{Q_w}{c \cdot M_w} = 109.33$$

Y la temperatura de la capa:

$$T_w = \theta_w + T_{ambiente} = 402.33 \text{ K} = 129.33^\circ\text{C}$$

Luego no se produce flashover o combustión súbita generalizada.

En el punto 6.4 calculamos el efecto del voladizo. En el Anexo C se indica que si la abertura o ventana de un recinto de incendio está a la misma altura que el sofite del vuelo que sobresale, no hay caudal de aire que penetre dentro de los humos, por tanto:

$$M_B = M_w$$

Puesto que el voladizo es de 1.5 m de longitud, debe llevar pantallas de canalización hasta el borde del derrame. Deben ser tan profundas como la capa de los gases que fluyen entre ellas hasta el borde de derrame:

$$d_B = \frac{0.36}{C_d} \cdot \left[ \frac{M_B \cdot T_B}{L \cdot \theta_B^{0.5} \cdot T_{amb}^{0.5}} \right]^{0.67}$$

donde

$$\theta_B = \frac{Q_B}{c \cdot M_B}$$

Y “L” es la separación entre pantallas, de 4.5 m.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

El valor de la profundidad es de 2.658 m, a lo que añadimos 0.1 m para obtener la profundidad de las pantallas, de 2.758 m.

En nuestro diseño no se va a impedir el derrame de los humos, sino que se va a permitir que se derrame. Puesto que el humo no se va a extraer en el recinto de origen, sino se va a ventilar desde una situación estable en el espacio principal del atrio. En nuestro caso, es un penacho libre, ya que se los humos se proyectan más allá del saliente horizontal del pasillo del primer piso. Hay que elegir una altura de ascenso del penacho que permita suficiente altura de aire limpio en las vías de evacuación para que las personas puedan utilizarlas. Además, la altura desde el borde de derrame hasta la base de la capa de humos no puede ser mayor de 9/10 de la altura desde el borde de derrame hasta el techo, es decir 9/10 de 12.5, lo que obliga a que la profundidad de la capa sea de 1.25 m mínimo. La distancia mínima libre en las vías de evacuación debe respetar lo recogido en la tabla 2 de la norma, en nuestro caso 2.5 m.

Por tanto, se va a escoger una profundidad de la capa de humos de 1.5 metros, de forma que las alturas de los recorridos libres sean de 5.5 metros en el pasillo del segundo piso, y la altura de ascenso de los humos sea de 11.00 metros, y se cumplan todos los requisitos de temperaturas y alturas. Se ha evitado la entrada de humos en los pasillos de evacuación al estar construido el atrio de forma que la superficie de las plantas superiores va decreciendo con la altura, con un ángulo menor de 70°, concretamente 57°.

Se pasa al Anexo D para calcular la masa circulante de humos:

D.1.1 Se comprueba que la profundidad:

$$d1 = 0.67 \cdot A_{res}^{0.5}$$

Siendo  $d1=3$  m y  $A_{res} = 495 \text{ m}^2$

$$1.5 < 14.91$$

Luego se aplica la expresión de la altura efectiva de ascenso del derrame.

$$X = H - 1.26 \cdot d1 = 12.5 - 1.26 \cdot 1.5 = 10.61 \text{ m}$$

A continuación, en D.3 se puede calcular el caudal entrante en el penacho (al ser nuestro caso el de penacho libre).

Hay que calcular primero los parámetros  $\Delta$  y  $A'$

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

$$A' = \frac{M_w}{W} \cdot \left[ 1 + \frac{0.85}{C_d^{3/2}} \right] + \frac{Q_w}{W \cdot c \cdot T_{amb}} \cdot \left[ 1 + \frac{1.16}{C_d^{3/2}} \right] = 7.67786$$

$$\Delta = \frac{3.8 \cdot A'}{Q_w^{1/3}} = 2.7868$$

El valor de la masa circulante de los gases que entran en la capa flotante del depósito de humos será:

$$M_x = 0.58 \cdot \rho \cdot W^{2/3} \cdot \left[ \frac{g \cdot Q_w}{\rho \cdot c \cdot T_{amb}} \right]^{1/3} \cdot (X + \Delta) \cdot \left[ 1 + \frac{0.22 \cdot (X + 2\Delta)}{W} \right]^{2/3}$$

$$M_x = 12.01937 \left( \frac{Kg}{s} \right)$$

Siguiendo el punto 6.6 y el anexo E de la norma se procede al cálculo de la temperatura de los gases en la capa flotante y al cálculo de los aireadores.

Primero se calcula el promedio de la temperatura de los gases en la capa de humos:

$$\theta_l = \frac{Q_l}{c \cdot M_l} = 94.33879$$

Se toma este valor para todo el depósito al no haber rociadores.

La temperatura absoluta de la capa de humos:

$$T_l = \theta_l + T_{amb} = 387.34 \text{ K} = 114.34 \text{ °C}$$

La profundidad mínima de la capa del depósito para el flujo hacia los aireadores de extracción es:

$$d_l = \left[ \frac{M_l \cdot T_l}{\gamma \cdot \theta_l^{0.5} \cdot W_l} \right]^{2/3} = 2.23 \text{ m}$$

Donde

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

$\gamma$  Es el factor de cuelgue, 78 si no está presente un dintel o cuelgue estructural en ángulo recto con el flujo, 36 en nuestro caso, puesto que hay una pasarela del primer piso.

$W_l$  Anchura del depósito de humos, medida en ángulo recto con la dirección del flujo de humos. 4 m.

Para diseñar el depósito y los aireadores se deben cumplir una serie de objetivos. Se va a optar por aireadores naturales de extracción. Se deben cumplir una serie de requisitos:

- La temperatura de diseño de la capa de humos debe ser como máximo 200°C.
- La temperatura media de los gases en la capa flotante no debe ser menor que 20°C por encima de la temperatura del aire ambiente.
- La superficie máxima del depósito de incendio debe ser de 1000 m<sup>2</sup> si se adoptan aireadores naturales.
- La máxima longitud de cualquier depósito de humos a lo largo de su eje mayor debe ser de 60m.

Por tanto, se decide dividir el depósito, que mide 82,5 m de largo, y no cumple con la longitud máxima. Mediante una cortina de separación de humos, se dividirá en dos mitades de 41.25 m, cumpliendo así con longitudes y áreas. De esta forma, se podrán usar los aireadores que no estén expulsando humo para la admisión de aire fresco.

Hay que calcular la superficie aerodinámica total libre de aireadores:

$$A_{vtot} \cdot C_v = \frac{M_l \cdot T_l}{\left[ 2 \cdot \rho_{amb}^2 \cdot g \cdot d_l \cdot \Theta_l \cdot T_{amb} - \frac{M_l^2 \cdot T_l \cdot T_{amb}}{[A_i \cdot C_i]^2} \right]^{0.5}}$$

Puesto que se va a utilizar renovación natural, utilizando los aireadores del depósito adyacente, la relación  $(A_{vtot} \cdot C_v)/(A_i \cdot C_i)$  será prácticamente 1. Elevando al cuadrado la ecuación y sustituyendo,

$$(A_{vtot} \cdot C_v)^2 = \frac{(M_l \cdot T_l)^2 + M_l^2 \cdot T_l \cdot T_{amb}}{2 \cdot \rho_{amb}^2 \cdot g \cdot d_l \cdot \Theta_l \cdot T_{amb}}$$

De lo que obtenemos que la superficie aerodinámica total libre ha de ser 4.58 m<sup>2</sup>. Se van a instalar exutorios de dimensiones 0.75x2.25 m, es decir, una superficie de 1.68 m<sup>2</sup>. En

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

favor de la seguridad, se van a instalar 6 de estos exutorios en cada depósito, es decir, 12 en total, como se ve en la figura 14. De esta manera, se igualan los exutorios que expulsan humo a los que admiten aire fresco, y se consigue la relación de ventilación natural anterior. Se han colocado a una distancia de 4.5 m entre ellos, excepto los dos exutorios centrales, que están a 6.75 m de separación, para mantener la distancia entre exutorios de distintos depósitos. Los exutorios de los extremos se encuentran a 2.25 m de los muros que delimitan la cubierta, en los lados norte y sur; y a 2.75 m de la pared oeste de la cubierta, de forma que estén centrados sobre el depósito.

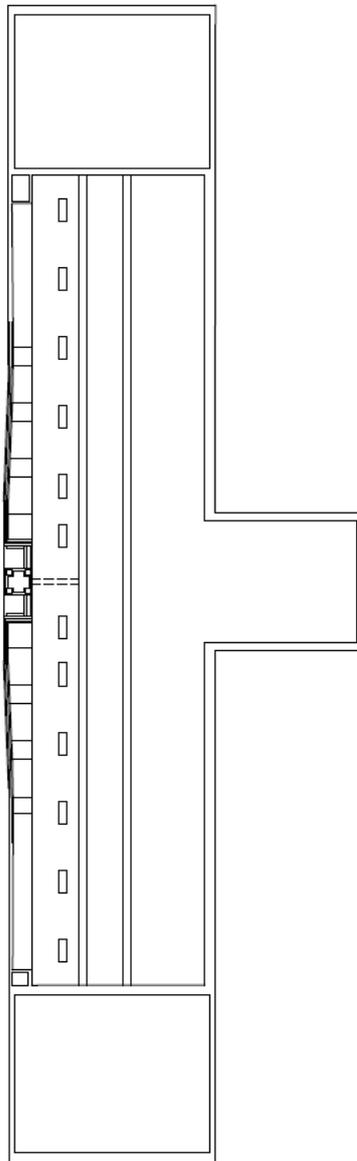


FIGURA 14 – COLOCACIÓN EXUTORIOS.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Se va a calcular el número de puntos de extracción mínimo necesario, ya que por cada aireador solo puede extraerse un valor máximo sin crear efectos “plugholing”, “vórtice” o “desagüe”. Según dónde estén colocados los aireadores, se calcula de manera distinta.

Si están montados en una pared o más cerca de la pared que la anchura característica del aireador:

$$M_{crit} = 1.3 \cdot [g \cdot d_n^5 \cdot T_{amb} \cdot \theta_l / T_l^2]^{1/2} \text{ kg/s}$$

Si están más lejos de una pared que la anchura característica de dicho aireador:

$$M_{crit} = \frac{2.05 \cdot \rho_{amb} \cdot [g \cdot T_{amb} \cdot \theta_l]^{0.5} \cdot d_n^2 \cdot D_v^{0.5}}{T_l} \text{ kg/s}$$

El número de orificios de extracción será:

$$N > \frac{M_l}{M_{crit}}$$

Para el caso de los aireadores colocados en la pared o muy cerca:

$$M_{crit} = 12.9690 \text{ (kg/s)}$$

Y para el caso en que se colocan lejos:

$$M_{crit} = 8.1695457 \text{ (kg/s)}$$

Puesto que la masa de gases circulantes es  $M_x=12.0194$  (kg/s), será necesario instalar como mínimo, 1 y 2 aireadores respectivamente según cada configuración. En cualquier caso, los 6 aireadores escogidos cumplen este criterio.

Hay que comprobar la carga de vientos según el ensayo de la norma UNE-EN 12101-2 Anexo D [8], para asegurar que no haya flujos de dirección inversa por presiones diferenciales. La estabilidad del aireador será suficiente si la carga de viento especificada es igual o mayor que la correspondiente carga de viento nacional, o la proyectada a partir de un estudio de túnel de viento, o la calculada de acuerdo con la norma UNE-EN 1991-1-4 [9]

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Para separar ambos depósitos, se va a utilizar una cortina para humos colgada-libre. La longitud de la cortina debe ser como mínimo 0.1 m más que la profundidad de la capa de humo del depósito. Hay que tener en cuenta el efecto de la presión de la capa de humos que empuja y curva hacia afuera la cortina, para escoger una longitud que aún en esa posición, siga conteniendo la capa de humos. En el Anexo G se propone un proceso de cálculo:

$$d_c = \frac{\rho_{amb}}{6} \cdot \frac{\theta_l \cdot d_{ls}^3}{(m + m_c \cdot d_n/2) \cdot T_l}$$

donde

$m$  es la masa por metro de longitud de la barra inferior;

$m_c$  es la masa por metro cuadrado del material de la cortina para humos;

$d_n$  es la longitud total de la cortina para humos;

$d_c$  es el desplazamiento horizontal de la cortina para humos.

El ángulo de desviación respecto de la vertical de la cortina se obtiene por:

$$\beta = \arctan(d_c/d_{ls})$$

La longitud total que necesita la cortina  $d_n$  se obtiene:

$$d_n = d_{ls} + d_c \cdot \left[ \frac{\arctan(d_c/d_{ls})}{2} \right]$$

El método iterativo para obtener  $d_n$  es el siguiente:

a) se adopta un valor  $d_n = d_{ls}$ ;

b) se calcula  $d_c$  con la ecuación anterior

c) se determina un nuevo valor de  $d_n = d_{n+1}$  con la ecuación anterior.

d) se repite el proceso a) a c) hasta que la discrepancia sea menor que el 1%:

$$\left[ \frac{d_n - d_{n+1}}{d_n} \right] \cdot 100 < 1$$

e) se aplica un margen de seguridad para compensar el curvado de la barrera:

$$\Delta d_n = 0.3 \cdot (d_n - d_{ls})$$

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

El valor final de la longitud total a instalar será:

$$d_n = d_n + \Delta d_n$$

Se va a utilizar una cortina de un material de  $450 \text{ g/m}^2$  y una barra de acero como contrapeso de 20 mm de diámetro y una masa de 2.46 Kg/m. Se parte de un valor de  $d_n=2.33 \text{ m}$  para realizar el proceso iterativo.

En la primera iteración se obtiene un  $d_n$  de 2.2369 m y una discrepancia del 4%. Se toma este valor como nuevo punto de partida.

En la segunda iteración se obtiene un  $d_n=2.23708 \text{ m}$  y una discrepancia del 0.13%. Se acepta el valor y se le añade el margen de seguridad. La longitud final es de 2.24 m, pero como la norma dice que como mínimo debe ser 0.1 m más larga que la profundidad de la capa de humos, nos quedamos con el valor de 2.33 m. Esta cortina irá situada de forma transversal en la parte superior de la cubierta, como se ve en la figura 15, dividiendo al depósito de humos en dos, cumpliendo el límite máximo de longitud.

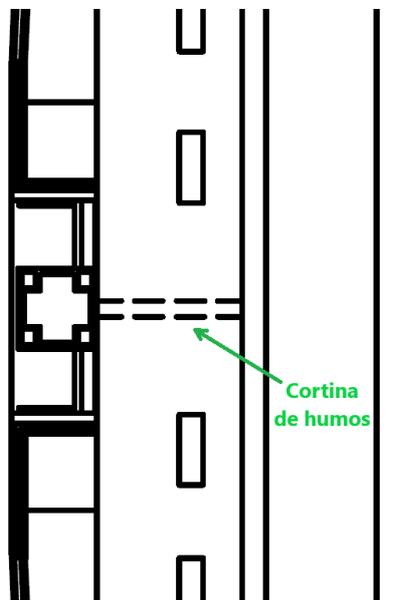


FIGURA 15 - DETALLE CORTINA DE HUMOS

Con esto concluye el cálculo del Sistema de Control de Temperatura y Evacuación de Humos. Como se mencionó anteriormente, las últimas secciones del DBSI, véase la Sección SI 4: Instalaciones de protección contra incendios; Sección SI 5: Intervención de los bomberos; y Sección SI 6: Resistencia al fuego de la estructura, no son de interés para este análisis.

## 8.2. Solución mediante diseño basado en prestaciones

Para esta solución, se va a partir del diseño inicial del edificio, expuesto en el apartado 3 - Alcance, y se van a realizar las modificaciones necesarias para cumplir los criterios de prestaciones establecidos.

En cuanto a sectorización y rutas de evacuación, Código Técnico de la Edificación permite no cumplir los criterios aplicados a la solución prescriptiva, siempre que se garantice un nivel de seguridad equivalente. Por lo tanto, no será necesario realizar la misma división en sectores de incendio, o mantener las distancias de seguridad por debajo del máximo de 50 metros.

Como solución alternativa se propone mantener las salidas S1 y S3 en la planta baja, definidas en la solución según el CTE, para aliviar la congestión de gente en las salidas S2 y S4 y así mejorar los tiempos de evacuación. Sin embargo, descartarán las escaleras internas de los Sectores 1 y 3 debido a su costosa elaboración. Estas escaleras ayudaban a cumplir las distancias de seguridad máximas de la solución prescriptiva, que ya no son obligatorias. En la figura 16, queda reflejada la planta baja de la propuesta. Las plantas primera y segunda no serán modificadas, y serán idénticas a las mostradas en las figuras 4 y 5 del apartado 3.

En cuanto a las medidas de protección contra incendios, se propone una solución distinta: controlar el fuego en su fase temprana mediante un sistema de rociadores automático. De esta manera, las condiciones causadas por el incendio, que suponen una amenaza para los ocupantes, se verán reducidas. Se mantendrá el sistema de control de humos mediante exutorios diseñado en el apartado anterior, pero se eliminará la cortina de humos, cuya única función era dividir el depósito de la cubierta para que su superficie no superara el máximo permitido por el Código Técnico. Esta modificación se puede ver en la figura 17.

Con estas medidas se pretende mejorar los tiempos de evacuación actuales para acercarlos al diseño según el CTE, sin modificaciones demasiado complicadas en la estructura del edificio, y controlar el incendio, de forma que el calor y las especies liberadas por el incendio sean de un peligro menor, de forma que se garantice un margen mayor para los ocupantes.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

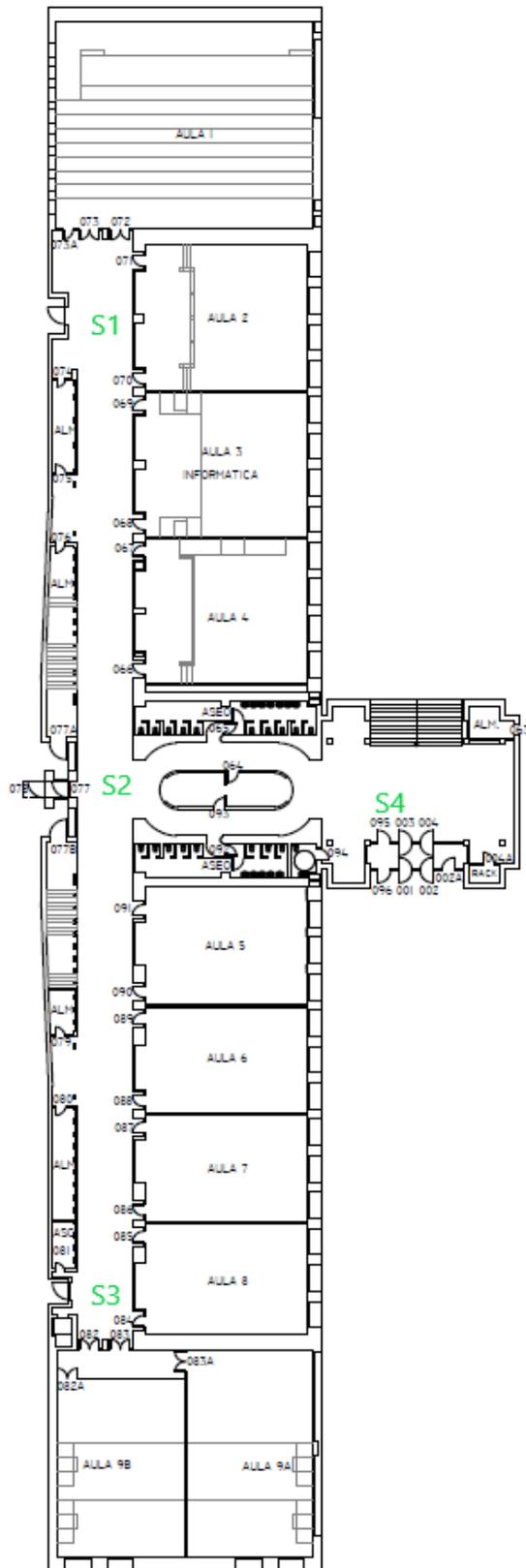


FIGURA 16 – PLANTA BAJA DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA

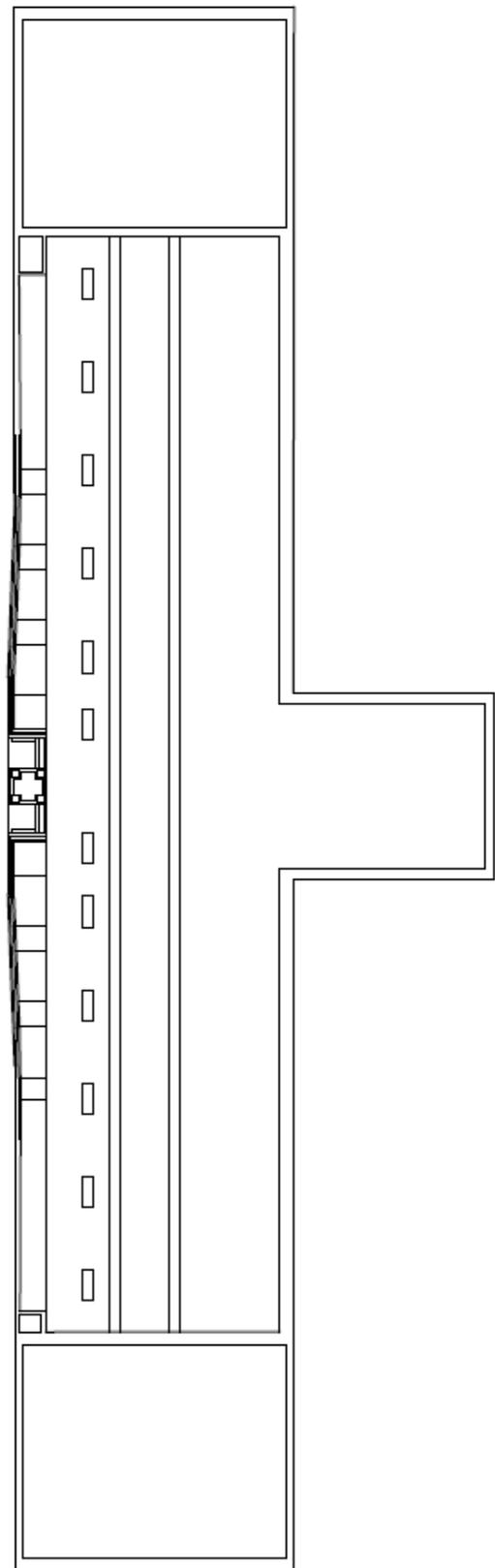


FIGURA 17 – CUBIERTA DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA

## 9. DETERMINAR LOS ESCENARIOS DE DISEÑO

Los escenarios de diseño se dividen en dos categorías:

- Escenarios de incendio de diseño (para el comportamiento del incendio)
- Escenarios de comportamiento de diseño (para el comportamiento de los ocupantes), que tratan tanto la seguridad de las vidas, como el posible impacto por el desarrollo del incendio.

Previamente al desarrollo de estos escenarios, se identifican los peligros que guían el proceso de selección.

### 9.1. Identificación de peligros

Antes de seleccionar los escenarios de incendio y de evacuación, se realiza una identificación de peligros, de forma metódica y organizada, de forma que se garantice que no hay omisiones, y que servirá de guía para el proceso de selección de casos de incendio. Los peligros pueden ser de dos tipos:

- Internos: productos de construcción y bienes, equipamiento de uso normal y seguridad en caso de incendio, tipo de ocupación y utilización del entorno, tipo de actividades y usos.
- Externos: actividades vecinas o peligros medioambientales naturales.

Esto se realizará de acuerdo al documento *ISO 16733-1 Selection of design fire scenarios and design fires* [10] que se indica a continuación.

### 9.2. Escenarios de incendio

Los escenarios de incendio deben ser descritos en términos cualitativos (para un análisis cualitativo) o cuantitativo (para un análisis determinista y un análisis de riesgo cualitativo). Una descripción cuantitativa de un incendio de diseño incluye las fases de inicio, crecimiento, desarrollo completo, decrecimiento y extinción, según el Objetivo de Seguridad evaluado. Un

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

escenario de incendio también puede incluir el efecto de medidas o acciones que influyan en el desarrollo del incendio.

Para un enfoque probabilístico, hay que escoger un número suficiente de escenarios de incendio para asegurar una representación adecuada del espacio. Para un análisis determinista, los casos de incendio deben escogerse para representar los peores casos creíbles. Esto requiere una consideración minuciosa de desafíos específicos de seguridad para el edificio, como por ejemplo afectación del humo a las salidas empleadas por los ocupantes. Para tener una seguridad aceptable, los casos de incendio para el análisis determinista también deben cubrir el riesgo asociado con casos no incluidos explícitamente en el análisis.

Para esto, la norma *ISO 23932-1 General Principles* [1] recomienda seguir el documento *ISO 16733-1 Selection of design fire scenarios and design fires* [10] para la selección de casos según un análisis determinista. Se va a seguir dicho documento en los apartados siguientes.

### **9.2.1. El papel de los escenarios de incendio de diseño en el diseño de la seguridad en caso de incendio**

Los escenarios de incendio de diseño son el fundamento de las valoraciones de ingeniería de seguridad en caso de incendio. Tales valoraciones implican analizar escenarios de incendio de diseño y extraer conclusiones de los resultados acerca de si el diseño propuesto cumple los criterios de prestaciones que han sido fijados.

El número de escenarios de incendio posibles en la mayoría de los edificios es prácticamente infinito. Es imposible analizar todos los escenarios, incluso con la ayuda de los recursos informáticos más sofisticados. Es necesario reducir estas infinitas posibilidades a un conjunto pequeño y manejable de casos de incendio de diseño, más asequibles de analizar, y que represente todo el rango de incendios que puedan suponer un desafío para el diseño de ingeniería.

Cada escenario de incendio de diseño se selecciona para representar un conjunto de casos de riesgo importante. Una vez se seleccionan los escenarios, se modifica el diseño del edificio hasta que el análisis demuestre que los criterios de prestaciones asociados con los objetivos de seguridad se cumplen, y el riesgo asociado al diseño es aceptablemente bajo.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

La caracterización de los escenarios de incendio de diseño con el propósito de análisis conlleva una descripción del inicio, crecimiento y extinción del fuego, así como las posibles zonas afectadas por las manifestaciones del incendio, bajo unas condiciones determinadas. Los impactos del humo y el fuego en la gente, propiedad, estructura y entorno son parte de las consecuencias relevantes en los incendios de diseño, y son parte de la caracterización de dicho entorno cuando esas consecuencias son relevantes para los objetivos de seguridad. La caracterización del crecimiento del fuego, la extensión del fuego y el humo, la extinción del fuego y el impacto del fuego y el humo, pertenecen al “incendio de diseño”.

### **9.2.2. El papel de los incendios de diseño en seguridad en caso de incendio**

Tras identificar los escenarios de incendio de diseño, es necesario describir las características del fuego asumidas en las que se basará la cuantificación del escenario. Estas características asumidas, así como el posterior desarrollo del incendio, se denominan “incendio de diseño”.

Una descripción completa del incendio de diseño desde la ignición hasta la desaparición se estima usando condiciones iniciales especificadas y una serie de cálculos simples para estimar parámetros como tiempo de activación de rociadores, transición a combustión súbita generalizada, o duración del fuego completamente desarrollado. Alternativamente, el incendio de diseño puede ser una combinación de condiciones iniciales cuantificadas y desarrollos del incendio determinados iterativamente o mediante cálculos usando modelos más complejos, que tienen en cuenta fenómenos como efectos transitorios de cambio de ventilación en la producción de humo, o efectos de retroalimentación termal desde una capa caliente hasta la superficie de combustible.

Es importante que el incendio de diseño sea adecuado para los objetivos de seguridad. Si la severidad del incendio de diseño es subestimada, la aplicación de métodos de ingeniería para predecir los efectos del incendio en otro lugar puede producir resultados que no reflejan el verdadero impacto, y pueden subestimar el peligro. Por el contrario, si la severidad es sobreestimada, puede resultar en gastos innecesarios.

### **9.2.3. Características de los escenarios de incendio**

Cada caso de incendio está representado por un suceso único y unas circunstancias asociadas con la naturaleza de las instalaciones y el origen del incendio, así como un conjunto particular de circunstancias asociadas con las medidas de seguridad. Estas últimas están definidas por el diseño de seguridad contra incendios, y las primeras deben ser especificadas para caracterizar el escenario.

### **9.2.4. Identificación de los escenarios de incendio**

Es necesario un enfoque sistemático en la identificación de escenarios de incendio para el análisis, de forma que se identifiquen los casos importantes. El número de posibles escenarios de incendio en un entorno construido puede ser muy grande, y no es posible cuantificarlos todos. Es necesario reducir este gran conjunto de posibilidades a un grupo manejable de escenarios de incendio que sea posible de analizar.

Cuando los criterios de prestaciones se dan de manera determinista, los escenarios de incendio de diseño se escogerán de forma que un diseño que ha mostrado aportar una seguridad aceptable para estos casos, se pueda depender de el para que aporte seguridad aceptable para todos los casos que no fueron analizados.

Es importante que el caso de incendio de diseño sea apropiado a los objetivos de ingeniería de seguridad contra incendios. En este caso, para un objetivo de seguridad de la vida de las personas, los casos de incendio de diseño deben suponer desafíos a la gente que se encuentre dentro del edificio. Hay varios enfoques posibles para identificar estos casos:

- 1) Identificar una lista de los escenarios prescritos relevantes para el edificio en particular. Suelen estar recogidos en códigos nacionales o estándares. Este enfoque es el más simple y fácil, pero tiene el peligro de que algunos escenarios potencialmente importantes, no sean considerados.
- 2) Aplicar un enfoque sistemático para determinar un conjunto de escenarios de incendio de diseño creíbles.
- 3) Seleccionar un conjunto de escenarios de conocida probabilidad y consecuencia. Este enfoque es mejor cuando se tienen datos históricos de incidentes o estadísticas relevantes del edificio.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Se va a seguir el enfoque 2, según el estándar, de forma que se pretende asegurar que los escenarios de diseño seleccionados comprendan todos casos creíbles, y aquellos escenarios no escogidos, se acuerdan como un riesgo asumible.

### **PASO 1 – IDENTIFICAR LOS DESAFÍOS DE SEGURIDAD ESPECÍFICOS**

#### - Identificar el uso del entorno construido:

Hay que identificar el uso o los usos del edificio, que puedan ser relevantes para el objetivo de seguridad, para garantizar que todos los tipos de personas en el edificio se han tenido en cuenta. Esto es particularmente importante para edificios multi-funcionales, como centros comerciales, aeropuertos, terminales de transportes y centros de conferencias.

En nuestro caso, el edificio es de uso docente. La entrada del vestíbulo principal es el acceso directo desde la calle, y además se encuentra en frente del parking, por lo que es la más conocida. Servirá como entrada y salida principal del edificio. El vestíbulo será por tanto una zona con mucho flujo de ocupantes, así como un punto de encuentro para los estudiantes.

En la zona del atrio hay dos pisos más la planta baja, cada uno con largos pasillos a lo largo de la nave, las aulas, escaleras, y algún despacho. Las aulas estarán ocupadas por los alumnos y profesores impartiendo las clases. Los pasillos y escaleras serán zonas de tránsito, o de encuentro de alumnos entre clases, así que es de esperar un nivel de ocupación moderado.

La zona de conserjería sirve de nexo entre la entrada del vestíbulo principal y la zona del atrio, además la gente acudirá a obtener información. También hay unos baños a ambos lados del recinto de conserjería. Esto hará que sea una zona bastante transitada y conocida por los ocupantes.

El edificio también es el entorno de trabajo, tanto para el personal de administración como de mantenimiento, que ocuparán sus puestos de trabajo en conserjería, en los despachos, o realizando labores de mantenimiento en cualquier parte que lo requiera. Teniendo en cuenta el objetivo de seguridad de las personas, los escenarios de incendio deberán desafiar las estrategias de evacuación del edificio.

#### - Identificar los objetivos a proteger:

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Los objetivos a proteger dependen de los objetivos de seguridad en caso de incendio establecidos en el apartado 4. Puesto que el único objetivo es garantizar la seguridad de las personas y que puedan llevar a cabo la evacuación en condiciones seguras, los objetivos a proteger son los ocupantes del edificio. Éstos a su vez pueden englobar distintos grupos con distintas características. Los ocupantes a tener en cuenta serán: estudiantes (fundamentalmente), profesores, personal de administración y de mantenimiento.

- Identificar las características importantes del objetivo:

Las características importantes son aquellas que más influyen en la amenaza que el incendio plantea a los objetivos. Cuando el objetivo son los ocupantes del edificio, las características de interés pueden ser la tendencia de los usuarios a seleccionar una ruta de evacuación, o su nivel de entrenamiento a la hora de extinguir incendios empleando un extintor, la familiarización con los procedimientos de evacuación y el layout del edificio, etc. También puede incluir la vulnerabilidad de grupos de los grupos de ocupantes, haciéndoles más susceptibles a los efectos del fuego y del humo.

En este caso, todos los grupos de ocupantes visitan el edificio a diario para realizar sus labores de trabajo o estudio, por lo que estarán bien familiarizados con las entradas y salidas del edificio, así como con el layout. Además, estarán realizando sus tareas diarias, luego se encontrarán despiertos y activos. Su nivel de entrenamiento a la hora de combatir el incendio con extintores será generalmente bajo, excepto para algunos miembros del personal de mantenimiento.

- Determinar los desafíos de seguridad:

Ya que la intención del análisis determinista es comprobar el diseño de seguridad en caso de incendio mediante una selección de escenarios severos pero creíbles, es imperativo identificar que problemas o conflictos, en combinación con el incendio, pudieran potencialmente llevar al fallo de diseño. Estos problemas y conflictos son referidos como desafíos seguridad.

Para el objetivo de seguridad de la vida de las personas, estos problemas suelen ser características de los ocupantes que llevan a respuestas o movimientos no óptimos en situaciones de emergencia.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Un desafío a la seguridad de las personas típico implica un conflicto entre el uso del edificio y los ocupantes, que es la tendencia de la gente a utilizar las salidas más familiares.

Por ejemplo, la entrada del vestíbulo principal es la más utilizada y la más familiar para la mayoría de los ocupantes, luego en caso de emergencia, será hacia la que todo el mundo se desplace. Es un cuello de botella potencial en caso de incendio. Además, un incendio que bloquee esta entrada es un caso que desafía severamente el diseño de seguridad.

Otro desafío interesante, al ser un edificio de varias plantas, es que alguna de las escaleras quede cortada por un incendio, lo cual obliga a todos los ocupantes a utilizar la escalera restante. Otro potencial cuello de botella.

### **PASO 2 – LOCALIZACIÓN DEL INCENDIO**

A continuación, se establecen los lugares más probables donde se puede iniciar un incendio. Siguiendo el Anexo A de la norma, se van a clasificar en grupos:

- Grupo (a): Espacios normalmente ocupados:

La zona de conserjería en la entrada principal. Es una zona de incendio probable, al haber material de oficina y equipos informáticos. Es probable que se produzca un incendio por un fallo eléctrico.

Todas las aulas de cualquiera de las plantas. Al igual que en la zona de conserjería, hay material de oficina, a veces equipos informáticos, y proyectores que pueden tener un fallo e iniciar un incendio.

Despachos. Como en los espacios anteriores, material de oficina y equipos electrónicos.

- Grupo (b): Espacios ocupables pero no ocupados normalmente:

Baños: es poco probable que haya un incendio en esta zona ya que no hay materiales combustibles ni elementos que puedan causarlo.

- Grupo (c): Medios de salida:

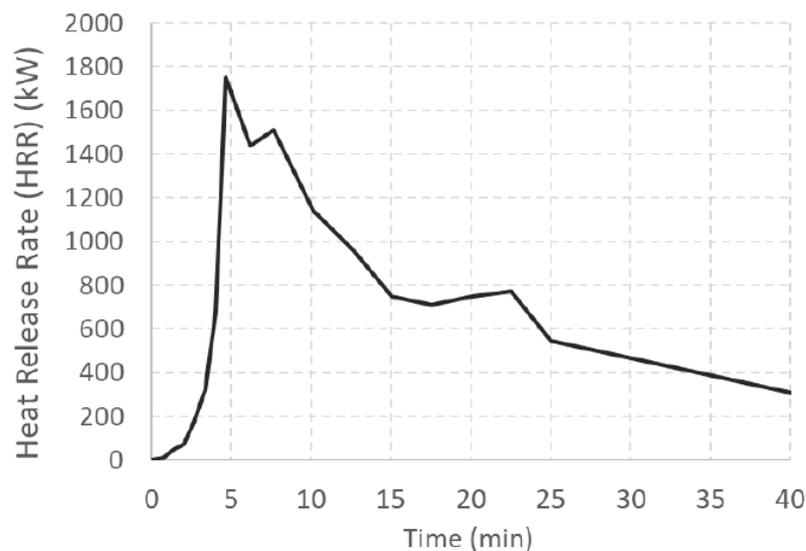
Escaleras y pasillos. No hay fuentes combustibles en estos espacios, pero un incendio aquí dificultaría la extracción del edificio, al bloquear alguna de las vías de escape.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- No hay zonas que pertenezcan a los grupos (d), salas con peligros mayores, o (e), espacios ocultos y localizaciones exteriores.

### PASO 3 – TIPO DE INCENDIO

Es necesario caracterizar las distintas fases del incendio, incluyendo ignición, crecimiento, desarrollo completo, y extinción. En este caso se va a utilizar como incendio de diseño el que se muestra en la figura y que se corresponde con el incendio de un puesto de trabajo (mesa con ordenador, libros, etc). Como se puede observar en la figura 18, la curva tiene un crecimiento rápido con un pico de calor liberado (HRR) de 1750 kW, Ref.: NIST “Standard Reference Database” Number 75 [8]. Esta curva se seleccionó ya que es posible que se de en las zonas escogidas, como un fallo de algún equipo electrónico, que pueda prender mesas de madera o papeles, de forma que crezca y se propague.



**FIGURA 18 - INCENDIO DE DISEÑO EN UN PUESTO DE TRABAJO DE OFICINA. REF. [11]**

Para la solución mediante rociadores, se va a utilizar otro tipo de incendio de diseño. En el Anexo C de la norma *ISO 16733-1* [10] se recogen distintas formas de curvas, según el tipo de control de incendio que se aplique. En el caso de un control por rociadores, la curva se ve limitada en la fase de crecimiento después de la activación del sistema automático, de forma que se mantenga un nivel de HRR más reducido durante el desarrollo, como se ve en la figura 19, extraída del Anexo C [10]:

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

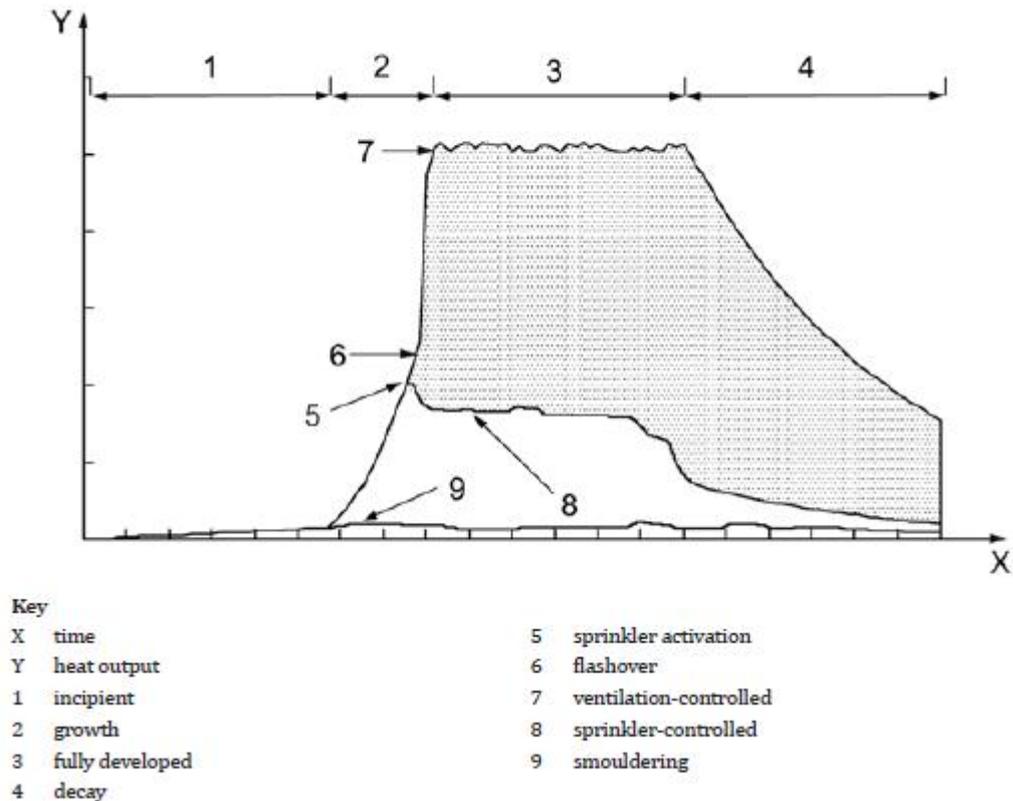


FIGURA 19 - CURVAS PARA DISTINTOS TIPOS DE INCENDIOS DE DISEÑO. REF. [10] ANEXO C

Es necesario por tanto conocer el instante de activación de los rociadores, para así conocer el valor máximo de HRR al que la curva se verá limitada.

Para conocer el tiempo de activación de los rociadores, se va a realizar un cálculo de las temperaturas alrededor del incendio. Se establece que la temperatura de activación del rociador sea de  $68^{\circ}\text{C}$ . Suponemos que el radio de cobertura de un rociador es de 2 metros, y que el origen del incendio se encuentra en la posición más alejada de un rociador, por ejemplo, en la mitad de la distancia entre dos de ellos, así estaremos considerando el caso más desfavorable ya que habrá el máximo retardo entre la ignición del incendio y la activación de un rociador.

Para este cálculo, se va a recurrir a un modelo de McCaffrey, según el libro *Enclosure Fire Dynamics – Björn Karlsson, James G. Quintiere* [9]. La expresión que representa la temperatura en la línea central del penacho de humos es:

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

$$\Delta T_0 = \left( \frac{K}{0.9 \cdot \sqrt{2g}} \right)^2 \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} T_\infty$$

donde:

$\Delta T_0$  Es la diferencia de temperatura en la línea central del penacho

$K$  y  $\eta$  Son unas constantes que varían según la región del incendio. Sus valores se recogen en la tabla 4.1.

En este caso, la relación  $z/\dot{Q}^{2/5} = 0.3361$ , que se clasifica como región del penacho, y los valores de las constantes  $K$  y  $\eta$  serán 1.1 y -1/3 respectivamente. Se toma la altura hasta el techo del recinto de conserjería,  $z=3.5$  metros.

Para conocer la temperatura a la distancia de 2 metros de la línea central del penacho, se aplican las siguientes expresiones, que dependen de la relación  $r/H$  representada en la figura 20:

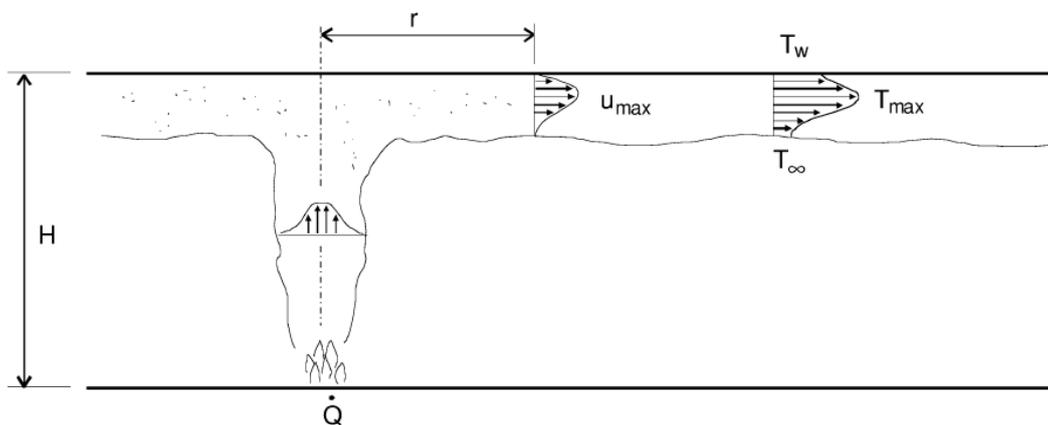


FIGURA 20 - IDEALIZACIÓN DEL FLUJO DEBAJO DE UN TECHO. REF. [12]

$$T_{max} - T_\infty = \frac{16.9\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}$$

Para  $r/H < 0.18$ , y

$$T_{max} - T_\infty = \frac{5.38(\dot{Q}/r)^{2/3}}{H}$$

Para  $r/H > 0.18$

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Se escoge la segunda expresión, ya que  $r/H = 2/3.5 = 0.57$ , el  $T_{max}$  a obtener es de  $68^{\circ}\text{C}$ , para que los rociadores se activen. Con un valor de  $\dot{Q} = 350 \text{ kW}$  se alcanza esta condición.

Con la expresión anterior, se puede calcular la temperatura cerca del eje del penacho, que es de  $124.03^{\circ}\text{C}$ , y como comprobación, se puede comparar con la temperatura obtenida de la expresión de McCaffrey.  $\Delta T_0 = 137.32^{\circ}\text{C}$ , luego  $T_0 = T_{\infty} + \Delta T_0 = 157.32^{\circ}\text{C}$ . Esta diferencia es debida al aumento en la mezcla del aire ambiente y a las pérdidas en calor cuando el penacho choca contra el techo.

El valor de  $\dot{Q}$  calculado corresponde al instante de 3 minutos en la curva del HRR del estudio utilizado en el caso de incendio anterior. Como margen de seguridad, se va a asumir que la activación de los rociadores se da a los 4 minutos, instante en que la curva del HRR quedará limitada en un valor de  $675 \text{ kW}$ .

### **PASO 4 – PELIGROS POTENCIALES QUE LLEVEN A OTROS CASOS DE INCENDIO**

Se descartan estos peligros potenciales. La zona está fuera de riesgo de peligros naturales, las actividades que se llevan a cabo son de tipo docente por lo que no se manejan materiales volátiles o tóxicos.

### **PASO 5 – SISTEMAS Y CARACTERÍSTICAS QUE INFLUYAN EN EL INCENDIO**

Hay que identificar los sistemas y características que, si fallan, es probable que influyan en el cumplimiento del objetivo de seguridad.

a) Sistemas pasivos: No hay materiales de control con tratamientos de retardo de incendio o inflamabilidad. Las únicas medidas de este tipo son las puertas utilizadas para la compartimentación de sectores.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

b) Sistemas activos: Sistema de detección de humos con alarma, sistema de gestión de humos mediante exutorios en la cubierta del atrio, y sistema de supresión activa (rociadores en el caso de la solución basada en prestaciones).

### **PASO 6 – ACCIONES DE LOS OCUPANTES QUE INFLUYAN EN EL INCENDIO:**

Puesto que los ocupantes no tienen ningún entrenamiento especial a la hora de combatir un incendio, es poco probable que traten de apagarlo, y es posible que dejen alguna puerta clave abierta, ayudando en su propagación.

### **PASO 7 – SELECCIÓN DE ESCENARIOS DE INCENDIO:**

Se van a escoger dos escenarios de incendio representativos:

El primer caso es un incendio en la zona de conserjería: es uno de los casos más probables debido a que el material de oficina y los equipos electrónicos presentes pueden servir como origen y combustible para el fuego, por ejemplo, por un fallo de un equipo electrónico, como un ordenador o una impresora.

Un incendio aquí supone además un desafío para la evacuación de los ocupantes, ya que bloquearía el paso entre el vestíbulo principal y la zona de aulas, impidiendo que se utilice como salida la entrada principal, que es la más familiar para la mayoría de los ocupantes, ya que la utilizan a diario. Esto obligaría a que todos los ocupantes usen las salidas de la zona de aulas, pudiendo provocar cuellos de botella.

Además, habrá que tener en cuenta también que el humo saldrá del recinto de conserjería y se derramará hacia la zona de aulas, ascendiendo hasta la cubierta. El humo se acumulará en este depósito, disminuyendo la visibilidad y pudiendo bloquear los pasillos y escaleras de evacuación.

El segundo caso es un incendio en una de las aulas ya que también presentan material de oficina y equipos electrónicos. Concretamente se va a escoger un aula del segundo piso, el aula 20, que se encuentra delante del acceso a la escalera de evacuación norte. El incendio aquí, una vez se expanda al pasillo, bloqueara el paso por delante de esta aula debido sobre todo a la

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

generación de humo, de forma que los ocupantes de la zona norte del pasillo no podrán acceder a las escaleras de evacuación más próximas.

Este caso es desafiante para la evacuación de los ocupantes ya que se verán obligados a recorrer todo el pasillo de la segunda planta, hasta la escalera sur, aumentando el tiempo de evacuación.

También estará presente el problema de la acumulación de humos en la cubierta, y la capa de humos irá descendiendo en altura, disminuyendo la visibilidad. Puesto que los ocupantes deberán pasar un mayor tiempo en la segunda planta, la primera que se verá afectada por la acumulación de humos y gases, estarán más expuestos a estas condiciones negativas, lo cual pondrá a prueba el cumplimiento del objetivo de seguridad.

### **9.3. Diseño de escenarios de comportamiento de ocupantes**

Cuando la vida de los ocupantes es el objetivo considerado, la evaluación de un diseño de protección contra incendios requiere una valoración de si los ocupantes están protegidos durante el periodo de tiempo desde que el fuego se inicia, hasta que alcanzan un lugar seguro.

La localización de los ocupantes en un edificio en cada instante, y la forma en que los ocupantes cambian de posición con el tiempo, durante uso normal y en situaciones de emergencia, depende de la interacción de una serie de parámetros relacionados con las características del edificio y los ocupantes, el sistema de gestión de seguridad contra incendios propuesto, y el desarrollo del escenario de incendio.

Para tener en cuenta la posibilidad y consecuencias de casos de incendio potenciales, es necesario definir las clases de ocupantes que pueden estar presentes. Su respuesta ante una condición de incendio está influenciada por una serie de variables como su número, distribución, familiaridad con el entorno, reacción a las manifestaciones del incendio, la caracterización del edificio, su uso, layout y servicios, los sistemas de alarma, medios de evacuación y nivel de gestión de emergencias. Estos atributos forman el escenario de comportamiento de los ocupantes, para ser considerado en la evaluación del diseño de la seguridad del edificio.

Es imposible analizar todos los casos, incluso con la ayuda de los recursos informáticos más sofisticados, por lo que es necesario reducir estas infinitas posibilidades a un conjunto de

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

casos manejables que sean más asequibles de analizar, y que representen colectivamente todo el rango de características de ocupantes que puedan estar presentes. Para esta selección, se seguirá el documento *ISO 29761 – Selection of design occupant behavioural scenarios and design behaviours* [13]. En dicho documento, se indican cuatro pasos para un enfoque sistemático hacia identificar casos de comportamiento de ocupantes:

**Paso A – Número de ocupantes y su distribución:**

Para obtener la carga de ocupantes del edificio, recurrimos al Documento Básico de Seguridad contra Incendios [3], en el que se indica, para un edificio de uso docente, una ocupación de 10 m<sup>2</sup> por ocupante, con lo que tendremos en total 609 personas en el edificio, divididas en las distintas plantas, según su superficie. De forma que la planta baja tiene 250 ocupantes, la primera planta 194, y la segunda 165, como se indicó anteriormente.

**Paso B – Características de la población ocupante:**

Los ocupantes del edificio van a ser de 3 tipos principalmente: alumnos, profesores y personal de administración. Se va a realizar una clasificación en tres grupos de edades: menores de 30 años, de 30 a 50 años y mayores de 50; y a su vez se va a dividir cada grupo en mujeres y hombres. De esta forma se podrá asignar distintos perfiles de velocidad de movimiento para cada grupo, basados en el estudio del IMO MSC/Circ. 1238 [14], del que se han extraído las tablas de valores 5 y 6.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

**TABLA 6 - VELOCIDADES DE DESPLAZAMIENTO EN LLANO. REF. [14].**

| Population groups – passengers               | Walking speed on flat terrain<br>(e.g., corridors) |               |
|--|--|---------------|
|  | Minimum (m/s)                                      | Maximum (m/s) |
| Females younger than 30 years                | 0.93   | 1.55          |
| Females 30-50 years old                      | 0.71   | 1.19          |
| Females older than 50 years                  | 0.56   | 0.94          |
| Females older than 50, mobility impaired (1) | 0.43   | 0.71          |
| Females older than 50, mobility impaired (2) | 0.37   | 0.61          |
| Males younger than 30 years                  | 1.11   | 1.85          |
| Males 30-50 years old                        | 0.97   | 1.62          |
| Males older than 50 years                    | 0.84   | 1.4           |
| Males older than 50, mobility impaired (1)   | 0.64   | 1.06          |
| Males older than 50, mobility impaired (2)   | 0.55   | 0.91          |
| Population groups – crew                     | Walking speed on flat terrain<br>(e.g., corridors) |               |
|  | Minimum (m/s)                                      | Maximum (m/s) |
| Crew females                                 | 0.93   | 1.55          |
| Crew males                                   | 1.11   | 1.85          |

**TABLA 7 -VELOCIDADES DE DESPLAZAMIENTO EN ESCALERAS. REF. [14]**

| Population groups – passengers               | Walking speed on stairs (m/s) |      |           |      |
|--|-------------------------------|------|-----------|------|
|  | Stairs down                   |      | Stairs up |      |
|  | Min.                          | Max. | Min.      | Max. |
| Females younger than 30 years                | 0.56                          | 0.94 | 0.47      | 0.79 |
| Females 30-50 years old                      | 0.49                          | 0.81 | 0.44      | 0.74 |
| Females older than 50 years                  | 0.45                          | 0.75 | 0.37      | 0.61 |
| Females older than 50, mobility impaired (1) | 0.34                          | 0.56 | 0.28      | 0.46 |
| Females older than 50, mobility impaired (2) | 0.29                          | 0.49 | 0.23      | 0.39 |
| Males younger than 30 years                  | 0.76                          | 1.26 | 0.5       | 0.84 |
| Males 30-50 years old                        | 0.64                          | 1.07 | 0.47      | 0.79 |
| Males older than 50 years                    | 0.5                           | 0.84 | 0.38      | 0.64 |
| Males older than 50, mobility impaired (1)   | 0.38                          | 0.64 | 0.29      | 0.49 |
| Males older than 50, mobility impaired (2)   | 0.33                          | 0.55 | 0.25      | 0.41 |
| Population groups – Crew                     | Walking speed on stairs (m/s) |      |           |      |
|  | Stairs down                   |      | Stairs up |      |
|  | Min.                          | Max. | Min.      | Max. |
| Crew females                                 | 0.56                          | 0.94 | 0.47      | 0.79 |
| Crew males                                   | 0.76                          | 1.26 | 0.5       | 0.84 |

El grupo más numeroso será el de los alumnos, y según los datos de matriculación en los planes de estudio del edificio, obtenido de las estadísticas disponibles en la página oficial

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

de la Universidad de Cantabria [15] el 67% serán mujeres, frente a un 33% de hombres; y se asumirá que su edad estará entre los 18 y los 30 años. En cuanto al resto de los ocupantes, no se ha podido encontrar información específica de su distribución, pero sí las ratios de estudiantes/profesor y estudiantes/personal de administración, de 9.67 y 14.10 respectivamente [16]. Con esto se puede estimar que el 85.15% de los ocupantes serán estudiantes de entre 18 y 30 años, formado por un 57.30% mujeres y 27.85% hombres respecto al total de ocupación del edificio. En el 14,85% restante, encontramos profesores y personal de administración, y se distribuirá de forma equitativa entre cuatro grupos: mujeres y hombres, de 30 a 50 años, y mayores de 50, de un 3.71% cada uno.

Todos los grupos compartirán la familiaridad con el edificio ya que trabajan o estudian a diario en el mismo.

### **Paso C – Actividades de los ocupantes.**

Estudiantes y profesores estarán participando en las clases, mientras que el personal de administración realizará trabajo de oficina o labores de mantenimiento. Los ocupantes estarán despiertos y con buena predisposición a percibir las alarmas de evacuación.

### **Paso D – Presencia y entrenamiento del personal.**

Puesto que la mayoría de los ocupantes son estudiantes, seguidos de profesores, se asumirá que nadie en estos grupos tiene entrenamiento a la hora de enfrentarse a un incendio.

#### **9.3.1. Diseño de comportamiento de ocupantes.**

Para esta sección, se van a seguir las recomendaciones de la norma *ISO/TR 16738 – Evaluating behaviour and movement of people* [17].

La evaluación de un diseño basado en prestaciones depende de una comparación de tiempos entre el tiempo disponible por los ocupantes para escapar o llegar a un lugar seguro (ASET: Available Safe-Escape Time), y el tiempo requerido para escapar (RSET: Required Safe-Escape Time).

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

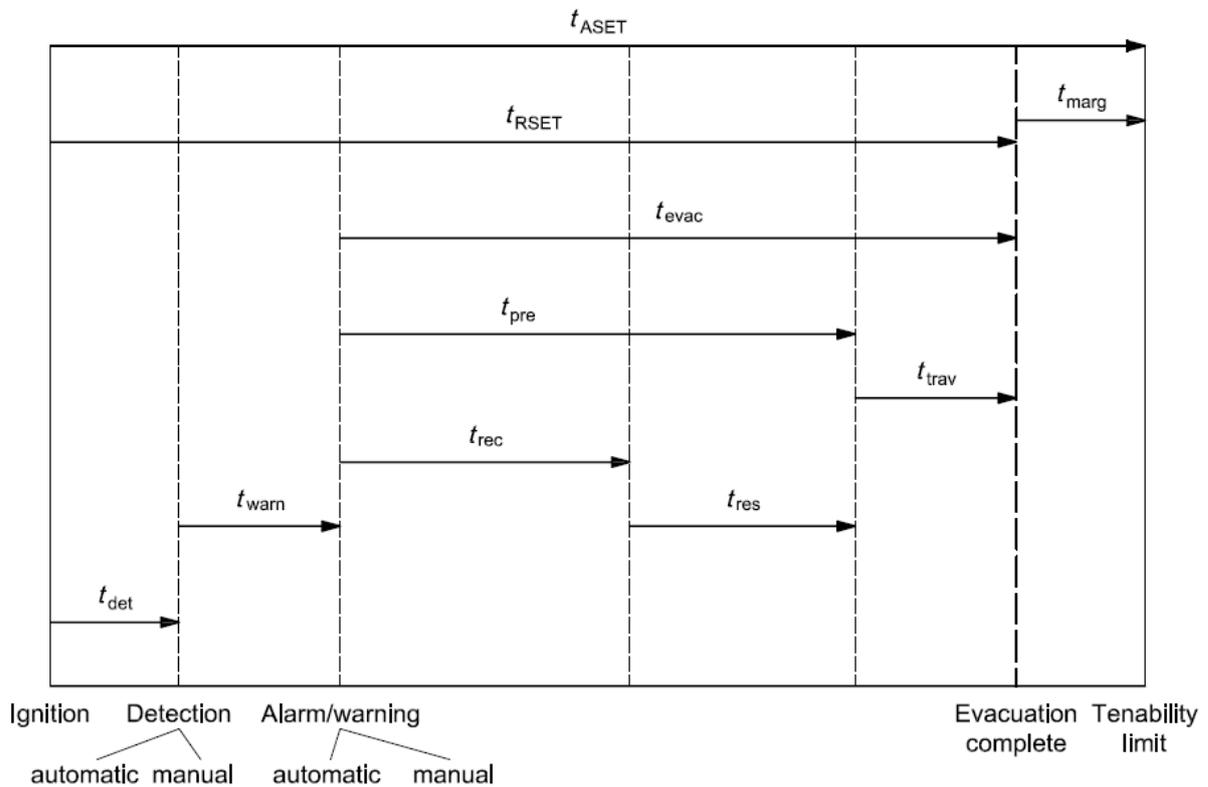


FIGURA 21 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LOS PROCESOS EN RSET EN COMPARACIÓN CON EL ASET. REF [17]

Cálculo del ASET:

Depende de parámetros relacionados con el desarrollo de peligros para los ocupantes debidos al incendio. Desde el momento que el incendio se inicia, más y más áreas se ven amenazadas. Por lo tanto, hay un ASET para cada espacio, antes de que las condiciones sean insostenibles. Para calcular el ASET, es necesario estimar las concentraciones de productos tóxicos, humo y calor en un incendio dado. En este estudio, se obtendrá esta información mediante un modelo de simulación computacional FDS, que permitirá obtener mediciones de los parámetros escogidos en los criterios de prestaciones a lo largo del tiempo de simulación. El ASET comprenderá desde el inicio del incendio hasta el momento en que alguno de estos valores, expresados en los criterios de prestaciones, sobrepase los límites establecidos.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

### Cálculo del RSET:

El tiempo de escape depende de una serie de parámetros relacionados con la detección, el aviso, el comportamiento de los ocupantes y el movimiento. Se puede simplificar en dos categorías:

- a. Comportamientos de actividad pre-desplazamiento, también conocidos como comportamientos de pre-movimiento. Tienen que ver con las respuestas de los ocupantes antes de que empiecen a moverse por las rutas de escape. Aunque pueden tratarse de periodos en los que los ocupantes están inactivos, también incluyen comportamientos de movimiento, pero no dirigidos hacia las rutas de escape. Un descubrimiento importante de las investigaciones de comportamientos es que, a menudo, la fase de pre-movimiento supone la parte más larga del tiempo total de escape.
- b. Comportamientos de movimiento: Tienen que ver con el movimiento físico de los ocupantes a través de las rutas de escape. Donde se predice que los ocupantes vean fuego o humo durante la evacuación, o están expuestos a calor o llamas del incendio, sus tiempos de pre-movimiento o movimiento pueden verse afectados.

La fórmula básica para determinar el tiempo de escape para un edificio es:

$$t_{RSET} = t_{det} + t_{warn} + (t_{pre} + t_{trav})$$

Para el cálculo de estos términos se seguirán los Anexos de esta norma ISO.

El Anexo A ofrece una guía para estimar los tiempos de detección y de aviso. Hay tres casos básicos de detección y alarma:

- a. Detección automática por todo el edificio, activando inmediatamente una alarma general para todos los ocupantes en todas las partes afectadas, siendo el  $t_{warn}$  prácticamente cero.
- b. Detección automática por todo el edificio, que suministra una pre-alarma a la administración o a seguridad, con una alarma general activada manualmente que suena en las partes ocupadas afectadas, y una alarma general que suena después de un retraso fijo, si la pre-alarma no se cancela.  $t_{warn}$  se toma habitualmente como

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

el retraso fijo (generalmente de 2 a 5 min). Este es el sistema instalado en el edificio, y se tomará este intervalo de tiempo de 2 a 5 minutos.

- c. Sistema local de detección y alarma sólo en el lugar del incendio, o ninguna detección automática, con una alarma manual.  $t_{warn}$  depende del caso de comportamiento, y de los primeros ocupantes alertados.

Los tiempos de aviso pueden ser cortos (menos de 2 min) si el personal alertado está bien entrenado, si no, puede ser largo e impredecible.

El Anexo D describe una serie de características cualitativas para clasificar el tipo de caso de comportamiento, referidas a los ocupantes, el edificio y sus sistemas, y los casos de incendio.

**TABLA 8 – CASOS DE COMPORTAMIENTO Y TIPOS DE OCUPACIÓN. REF. [17] ANEXO D**

| Category | Occupant alertness   | Occupant familiarity | Occupant density | Enclosures/ complexity | Examples of occupancy types                                    |
|----------|----------------------|----------------------|------------------|------------------------|--|
| A        | Awake                | Familiar             | Low              | One or many            | Office or workshop areas                                       |
| B1       | Awake                | Unfamiliar           | High             | One or few             | Shop, restaurant, circulation space, bar                       |
| B2       | Awake                | Unfamiliar           | High             | One with focal point   | Cinema or theatre auditorium                                   |
| C        | Asleep               |                      |                  |                        | Dwelling bedroom   |
| Ci       | Individual occupancy | Familiar             | Low              | Few                    | Without 24 h on-site management                                |
| Cii      | Managed occupancy    | —                    | —                | —                      | Bedroom in serviced flats, halls of residence, residence, etc. |
| Ciii     | Asleep               | Unfamiliar           | Low              | Many                   | Hotel, hostel bedroom  |
| D        | Medical care         | Unfamiliar           | Low              | Many                   | Residential (institutional)                                    |
| E        | Transportation       | Unfamiliar           | High             | Many                   | Railway station/airport halls                                  |

En la tabla 8 se ofrece una clasificación de los ocupantes. Para nuestro caso, la categoría A es la que mejor se ajusta. Se refiere a espacios de trabajo, como oficinas o talleres, en los que los ocupantes están despiertos y realizando actividades, y son familiares con los edificios y sus sistemas, lo frecuentan diariamente e invierten un tiempo significativo allí.

Modificadores de comportamiento en cada categoría:

En cada categoría, las características del comportamiento de ocupantes, el tiempo de alarma, y el tiempo de pre-movimiento, dependen en una serie de variables de las cuales, las tres siguientes son consideradas importantes:

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- Calidad del sistema de alarma (clasificado de A1 a A3)
- Complejidad del edificio (clasificado de B1 a B3)
- Calidad de la gestión de seguridad en caso de incendio (clasificado de M1 a M3)

El sistema de alarma tiene un efecto en el de pre-movimiento. Se definen tres niveles de alarma: A1, A2 y A3. Este caso corresponde al nivel A2 (dos fases), detección automática a lo largo del edificio, que envía una pre-alarma a administración o seguridad, con un sistema de aviso general activado manualmente, que suena por las zonas ocupadas afectadas, y una alarma general que se activa tras un retraso fijo, si la pre-alarma no es cancelada.

La complejidad del edificio afecta al tiempo de pre-movimiento y al tiempo necesario para buscar la ruta de salida. De nuevo hay tres niveles de complejidad: B1, B2, y B3. Nuestro caso encaja en la clasificación B2, de edificio multi-planta, con múltiples cerramientos simples, la mayoría de las características desarrolladas de forma prescriptiva y con layout internos simples.

En cuanto al nivel de gestión de seguridad contra incendios, también hay tres niveles de clasificación: M1, M2 y M3. En nuestro edificio, es del tipo M2, que concuerda con la complejidad del edificio B2, y el tipo de alarma A2. El personal está entrenado en cuanto a seguridad contra incendios, aunque hay un menor ratio de personal/visitantes.

### **9.3.2. Estimación de los tiempos de pre-movimiento**

Aunque los tiempos de detección y alarma son valores individuales, una dificultad de los tiempos de pre-movimiento y de desplazamiento, es que son variables para cada ocupante. Por tanto, es necesario considerarlos como distribuciones. El Anexo E indica como considerar esto, en base a la clasificación realizada de las distintas características del edificio.

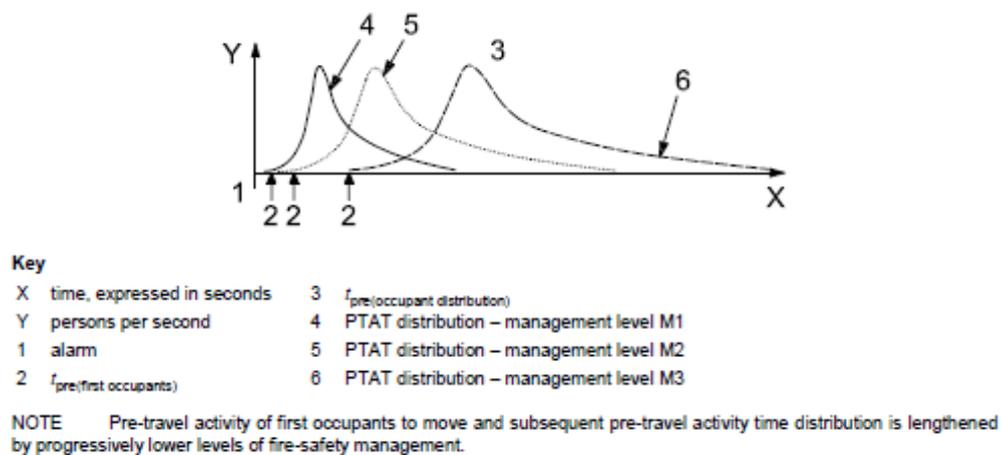
Las características determinadas en el apartado anterior influyen en la actividad pre-movimiento. El tiempo de pre-movimiento consiste en dos fases:

- tiempo desde la alarma hasta el movimiento de los primeros ocupantes para comenzar su fase de desplazamiento.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- subsecuentes distribuciones de tiempo para que el resto de los ocupantes empiecen su fase de desplazamiento.

Una vez que los primeros ocupantes empiezan a moverse, las distribuciones de tiempos de pre-movimiento siguen distribuciones aproximadamente logaritmo-normales, con un rápido incremento en el número de ocupantes que empiezan a moverse en cuanto comienza la distribución, y una larga cola hasta que los últimos ocupantes se mueven, como se ve en la siguiente figura tomada del documento ISO 16738 [17]:



**FIGURA 22 - REPRESENTACIÓN DE DISTRIBUCIONES DE TIEMPOS DE PRE-MOVIMIENTO Y EFECTOS DE LOS DISTINTOS NIVELES DE GESTIÓN DE SEGURIDAD. REF [17] ANEXO E.**

En la tabla E.2 encontramos valores de pre-movimiento para los distintos casos de comportamientos de diseño. Para una ocupación de tipo A, con modificadores de alarma A2, complejidad del edificio B2, y gestión de seguridad contra incendios M2, tenemos una distribución de tiempos de pre-movimiento cuyo percentil 1 es de 1 minuto y su percentil 99 es de 3 minutos. En el modelo de evacuación en Pathfinder, se añadirá, de forma aleatoria a cada ocupante, un tiempo de pre-movimiento según una distribución normal basada en esos percentiles.

El tiempo de movimiento  $t_{trav}$  se contabiliza desde que el ocupante inicia el movimiento hasta que alcanza una de las salidas. Por tanto, dependerá de la posición inicial de cada ocupante, la ruta y la salida escogida, y su velocidad de movimiento. Este tiempo se obtendrá de las distintas simulaciones a realizar en el modelo computacional.

## 10. SELECCIÓN DE MÉTODOS DE INGENIERÍA

Es necesario seleccionar métodos de ingeniería que valorarán si el diseño de seguridad en caso de incendio cumple los objetivos de seguridad. Este proceso de selección implica determinar qué métodos tienen una precisión y eficiencia aceptables para demostrar que los criterios de prestaciones se cumplen, como resultado del análisis de uno o más escenarios de incendio de diseño.

Hay varios modelos de ingeniería posibles que pueden ser usados en el diseño basado en prestaciones y a continuación se detallan los empleados en el presente proyecto.

### 10.1. Modelo de incendio

#### 10.1.1. Introducción

El diseño de seguridad contra incendios basado en prestaciones habitualmente requiere el uso de modelos, mediante ecuaciones algebraicas, métodos de cálculo, o software de simulación computacional, para estimar las consecuencias de los escenarios de incendio de diseño. Estos modelos pueden referirse a un fenómeno específico de incendio, como penachos, capas de humo, flujos de ventilación; o describir un incendio y la propagación de los humos a un nivel completo, por ejemplo, con modelos de zona o modelos de campo basados en dinámica de fluidos computacional (CFD).

En el presente proyecto se empleó un modelo de campo denominado Fire Dynamics Simulator (FDS), desarrollado por el Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Technology – NIST (USA) con la colaboración del VTT Building and Transport in Finland. Actualmente este modelo es uno de los más empleados a nivel internacional en el ámbito del modelado y simulación computacional de incendios. Para facilitar la creación de los ficheros de entrada de FDS, se ha empleado el software Pyrosim desarrollado por Thunderhead Engineering.

FDS es un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) concebido de manera específica para reproducir el fenómeno del incendio, que resuelve una forma de las ecuaciones de Navier-Stokes adecuada para aplicaciones con bajo número de Mach. Las derivadas parciales de las ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía se aproximan

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

en diferenciales finitos, y la solución se calcula basándose en técnicas de volúmenes finitos. Además, se emplean partículas lagrangianas para simular el movimiento de los humos y de las gotas de los sprinklers.

A continuación, se describirán las ecuaciones que gobiernan el modelo de FDS:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{u} = 0 \quad \text{Ec. Conservación de la Masa}$$

$$\frac{\partial \rho Y_l}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \rho Y_l = -\rho Y_l \nabla \cdot \bar{u} + \nabla \cdot \rho D_l \nabla Y_l + \dot{m}_l^m \quad \text{Ec. Conservación de las Especies}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \nabla \cdot \rho \bar{u} \bar{u} = -\nabla p + \rho \bar{f}_T + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad \text{Ec. Conservación del Momento}$$

(Navier – Stokes)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \bar{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \bar{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l \quad \text{Ec. Conservación}$$

de la energía

$$p_0 = R \rho T \sum_l \frac{Y_l}{M_l} \quad \text{Ec. de Estado}$$

### 10.1.2. Geometría y parámetros de entrada

A la hora de definir la geometría de la edificación, y de cara a optimizar el número de celdas en nuestro modelo, se han seleccionado dos zonas de mallado distintas, una para el vestíbulo principal, y otra para la zona de aulas y el atrio. Para escoger el tamaño de la malla, se siguieron las recomendaciones de la *Guía de Usuario de FDS* [18], que indica la siguiente expresión para simulaciones con penachos de humo:

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} = 1.18798$$

Donde:

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

$D^*$  es un diámetro característico de incendio

$\dot{Q}$  es el HRR total, es decir 1750 kW, según el incendio de diseño considerado.

$\rho_{\infty}$  es la densidad del aire en condiciones normales y se ha tomado un valor de 1.225 kg/m<sup>3</sup>.

$C_p$  es el calor específico del aire, de  $1.012 \frac{J}{g \cdot K}$ .

$T_{\infty}$  es la temperatura en condiciones normales, de 293 K.

$g$  es la gravedad, se ha tomado 9.81 m/s<sup>2</sup>.

Se define  $\delta x$  como el tamaño nominal de una celda de la malla. En la *Guía de Validación FDS – Table 3.31: Summary of important numerical parameters* [19], se encuentra una serie de valores aceptables, para elegir el tamaño de la malla, según la relación  $D^*/\delta x$ . Para los test de NIST FSE, el valor de  $D^*$  se encuentra entre 0.4-1.4, y la relación  $D^*/\delta x$  entre 3.8-14. Si escogemos un tamaño de celda de 0.25 (m), la relación obtenida es de  $D^*/\delta x = 4.752$  que se encuentra dentro de los valores recomendados.

Por tanto, las celdas serán de 0.25 x 0.25 x 0.25 m en ambas mallas, y la zona del vestíbulo quedará dividida en 220.864 celdas, y la zona de aulas en 2.502.400 celdas, siendo en total 2.723.264 celdas para todo el dominio computacional.

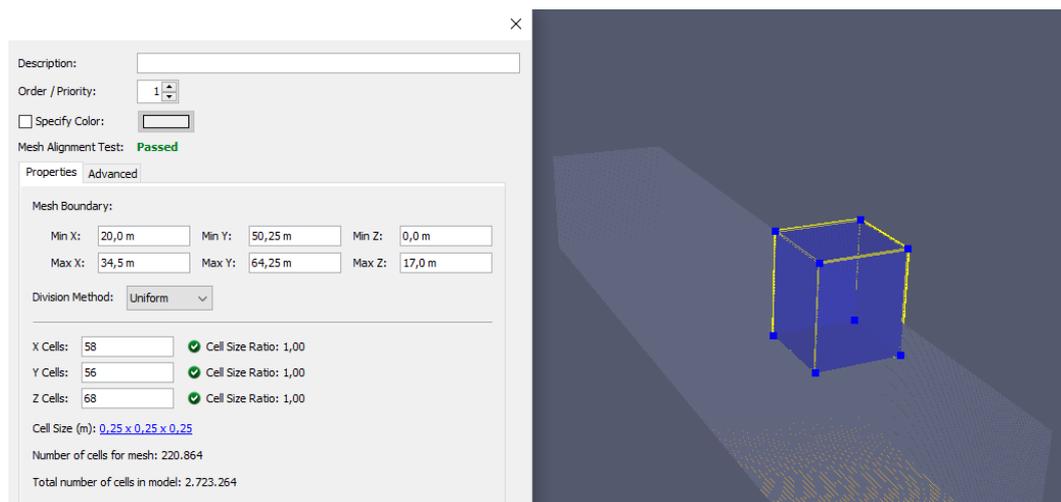
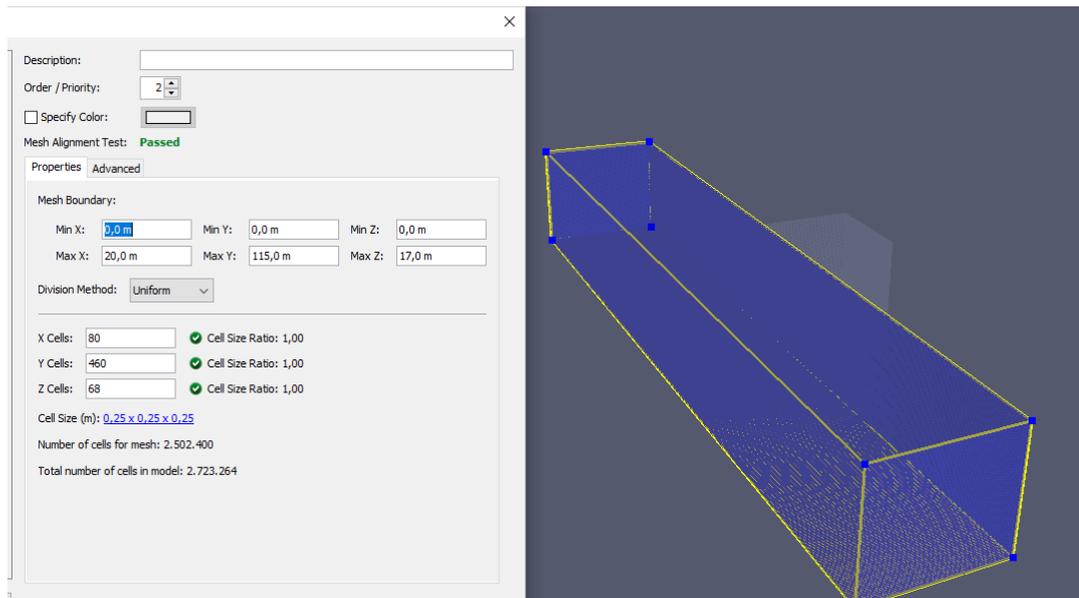


FIGURA 23 - MALLADO DEL VESTÍBULO

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.



**FIGURA 24 - MALLADO DE LA ZONA DE AULAS**

La geometría del edificio deberá ajustarse al tamaño de la malla. Por ejemplo, la altura de las plantas, que tal como se expresaron en el alcance del proyecto eran de 4.4 metros para la primera planta y 8.8 metros para la segunda planta, se tendrán que representar como 4.5 metros y 9 metros respectivamente para adaptarse al tamaño de celda seleccionado.

Otras dimensiones de la geometría notables como la anchura de los pasillos, escaleras y puertas, se han ajustado a la malla por defecto, en favor de la seguridad. La anchura de las escaleras de descenso en la zona del atrio, originalmente de 1.90 metros de anchura, se han ajustado a 1.75 m; la anchura del pasillo del primer piso, en el que se encuentran las columnas de hormigón que obstruyen el paso, se ha ajustado de 1.40 m a 1.25 m; la anchura de los accesos del pasillo del primer piso a las escaleras, se ha ajustado de 3.30 m a 3.25 m; en el segundo piso, la conexión norte del pasillo a las escaleras, se ha ajustado de 1.35 m a 1.25 m.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

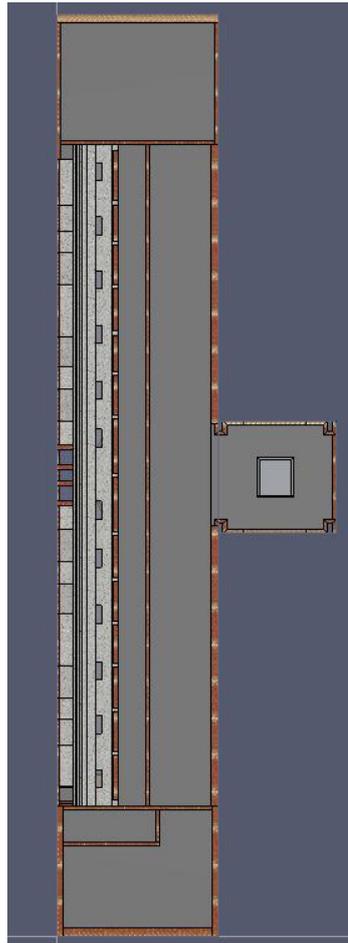


FIGURA 25 - DETALLE DE LOS EXUTORIOS

Como reactante, se escoge madera de roble, cuyos valores son definidos según el *SFPE Handbook*, [6].

Los materiales a utilizar serán: ladrillo, hormigón y vidrio; que están en la biblioteca del programa, definidos según el documento del NIST *NBSIR 88-3752 – NBS Multi-Room Validation* [20], y *Drysdale, Intro to Fire Dynamics – ATF NIST Multi-Floor Validation* [21]. Los valores utilizados son los siguientes:

TABLA 9 - PROPIEDADES DE MATERIALES DEL MODELO

|          | Calor específico<br>(KJ/Kg·K) | Conductividad<br>(W/m°C) | Densidad<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Ladrillo | 1.04                          | Rampa*                   | 750                              |
| Hormigón | 1.04                          | 1.8                      | 2280                             |
| Vidrio   | 0.84                          | 0.76                     | 2700                             |

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

A su vez, la conductividad del ladrillo viene definida por una curva en función de la temperatura, definida en la tabla siguiente:

**TABLA 10 - CONDUCTIVIDAD DEL LADRILLO**

| <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Conductividad (W/m°C)</b> |
|-------------------------|------------------------------|
| 20                      | 0.36                         |
| 200                     | 0.36                         |
| 300                     | 0.38                         |
| 600                     | 0.45                         |

Para simular el origen del incendio, se utilizará una obstrucción como Burner, y se introducirá la curva vista en los apartados anteriores del puesto de trabajo del NIST como valor del HRR. La obstrucción tendrá forma de prisma de 0.5 m de ancho, por 1m de largo, por 1 m de alto, asemejándose a una mesa. La superficie superior de esta obstrucción será el Burner. Puesto que su superficie es de 0.5 m<sup>2</sup>, y el HRR hay que introducirlo en unidades de kW/m<sup>2</sup>, se introduce un valor de pico de 3500 kW/m<sup>2</sup>, para que el valor total sea el de 1750 kW establecido en el incendio de diseño. Posteriormente se introducen el resto de los puntos significativos de la curva, indicando el instante de tiempo, y su valor como una fracción del valor de pico. Estos son los puntos introducidos:

**TABLA 11- VALORES DE HRR**

| <b>Tiempo (min)</b> | <b>HRR (kW)</b> | <b>Tiempo (seg)</b> | <b>HRR (fracción)</b> |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| 2                   | 75              | 120                 | 0.042857143           |
| 3                   | 350             | 180                 | 0.2                   |
| 4                   | 675             | 240                 | 0.385714286           |
| 5                   | 1750            | 300                 | 1                     |
| 6                   | 1425            | 360                 | 0.814285714           |
| 7.5                 | 1500            | 450                 | 0.857142857           |
| 10                  | 1150            | 600                 | 0.657142857           |
| 15                  | 750             | 900                 | 0.428571429           |
| 17.5                | 700             | 1050                | 0.4                   |
| 22.5                | 775             | 1350                | 0.442857143           |
| 25                  | 550             | 1500                | 0.314285714           |
| 40                  | 300             | 2400                | 0.171428571           |

Para el incendio en la solución basada en prestaciones, en la que se incluye el efecto de los rociadores, se introducirá el otro incendio de diseño, definido en el apartado 9.2.4.3, de un

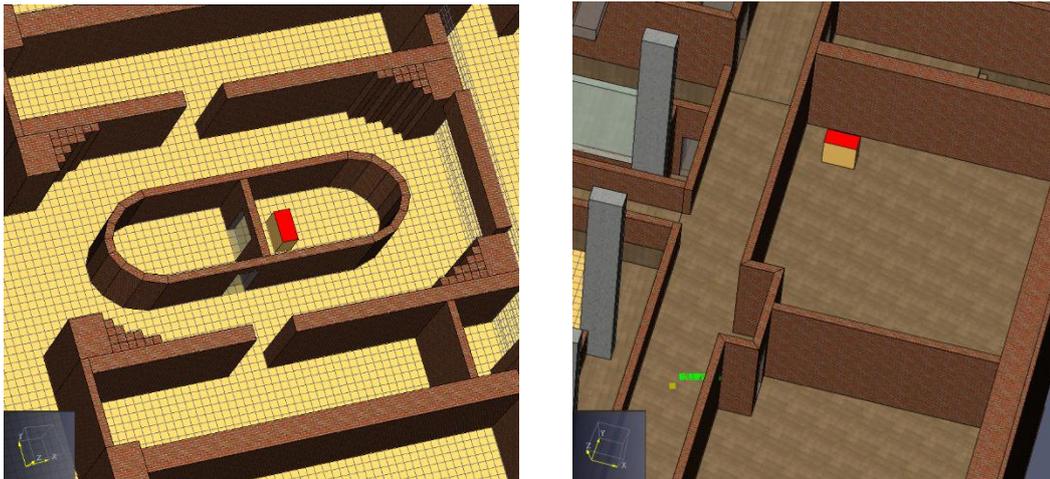
## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

crecimiento limitado por el efecto de los rociadores. Para dicho incendio, cuyo valor de pico de HRR es de 675 kW, se ha introducido un valor en el modelo de 1350 kW/m<sup>2</sup>, y la tabla de valores es la siguiente:

**TABLA 12 - VALORES DE HRR PARA INCENDIO CONTROLADO POR ROCIADORES**

| Tiempo (min) | HRR (kW) | Tiempo (seg) | HRR (fracción) |
|--------------|----------|--------------|----------------|
| 2            | 75       | 120          | 0.111111111    |
| 3            | 350      | 180          | 0.518518519    |
| 4            | 675      | 240          | 1              |
| 12           | 675      | 720          | 1              |

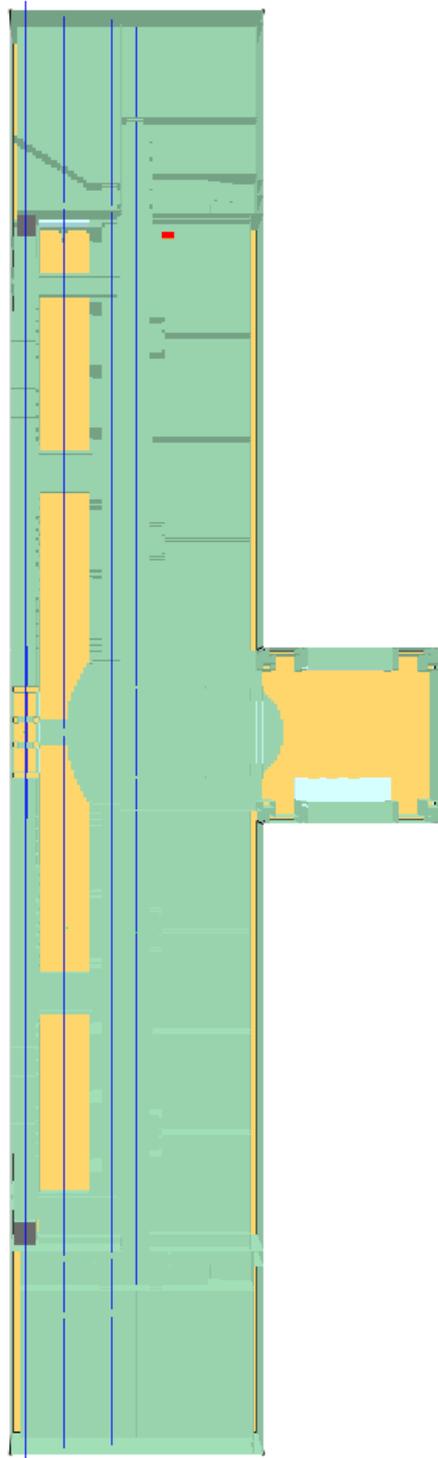
Las obstrucciones que actuarán como origen del incendio se han colocado según los casos de incendio definidos, en el recinto de conserjería de la planta baja, y en el aula 20 del segundo piso:



**FIGURA 26 - DETALLE DE COLOCACIÓN DE BURNERS**

Para obtener los resultados numéricos, se van a colocar una serie de slices 2D, y una de devices o medidas puntuales. Se van a utilizar cuatro Slices 2D, que son planos de corte que recogen los valores de las magnitudes a medir y permiten la visualización de una forma cualitativa, mediante códigos de colores, de forma que se puede interpretar de forma intuitiva la evolución de las condiciones. Se han colocado en las escaleras laterales, y en los pasillos de la planta baja, planta primera y planta segunda, en las coordenadas del modelo x=1.25, x=4.25, x=8 y x=10 respectivamente, como se pueden apreciar en la figura 27 resaltados en azul. Estos slices medirán las magnitudes asignadas a los criterios de prestaciones, que son temperatura, visibilidad, concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

**FIGURA 27 – VISTA EN PLANTA DE PLANOS SLICE**

Los devices para la medición puntual de los diferentes parámetros están colocados por todos los pasillos y los rellanos de las escaleras de salida, así como en las puertas de las salidas. En todos los puntos de medición se han tomado valores de temperatura, visibilidad, concentraciones de oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, y radiación, y se

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

nombran mediante las iniciales T, V, O2, CO, CO2 y RAD respectivamente. Se han situado a 1.75 metros de altura sobre cada planta. En la planta baja se colocan en 6 posiciones a lo largo del pasillo, y en las salidas del edificio. Además, en el escenario en el que se incluyen los rociadores, se han colocado unos devices adicionales para medir las temperaturas alrededor del origen del incendio.

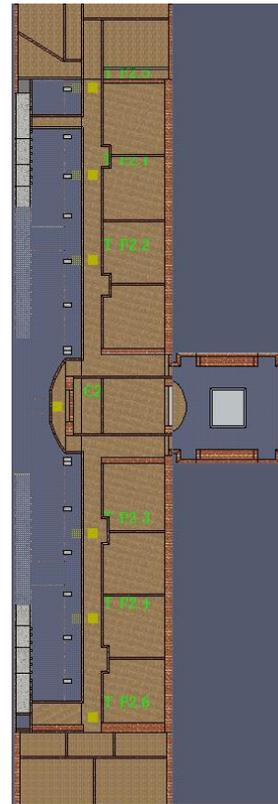
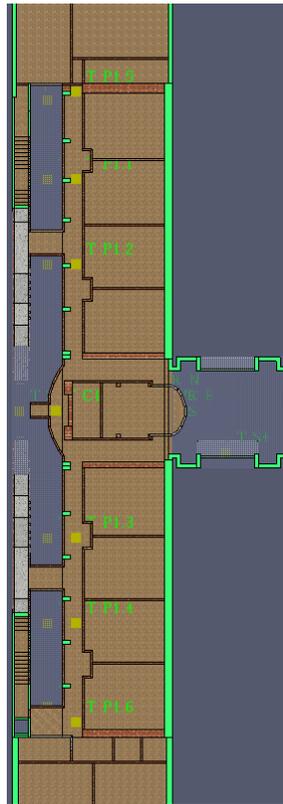
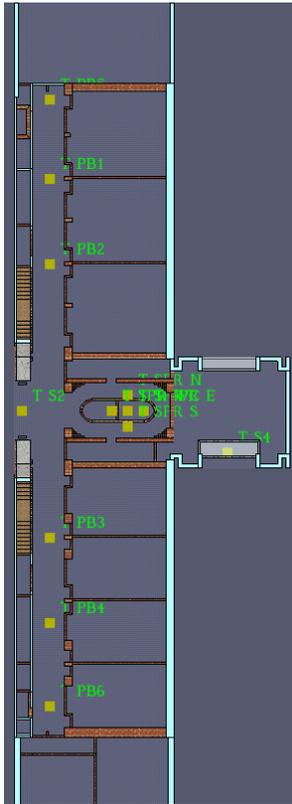
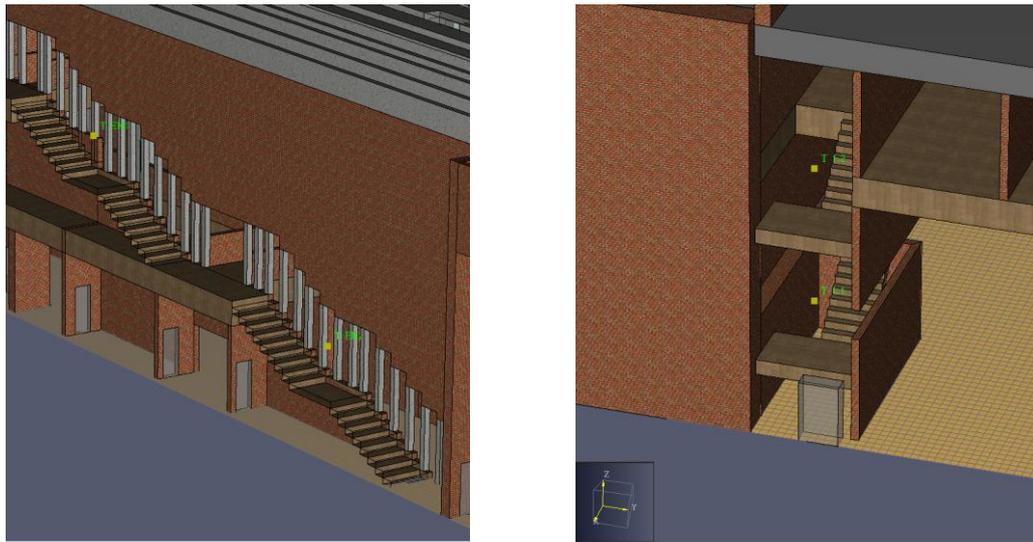


FIGURA 28 - DEVICES PLANTA BAJA    FIGURA 29- DEVICES PRIMERA PLANTA    FIGURA 30 - DEVICES SEGUNDA PLANTA

En la primera y segunda planta se sigue el mismo esquema. Se han colocado en 6 posiciones de cada pasillo, y uno en la zona central justo encima del ascenso del penacho de humos. En las escaleras laterales del edificio se han colocado también en los descansos de los tramos de descenso, ya que son zonas bastante transitadas en la evacuación. Para la solución prescriptiva, que incluye las escaleras interiores de los sectores 1 y 3, se han añadido dos posiciones de medida en cada una de ellas, que no están presentes en los otros modelos.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.



**FIGURA 31 - DETALLES DE DEVICES EN ESCALERAS**

Con estas mediciones, se obtendrán los valores cuantitativos para evaluar los Criterios de Prestaciones, habiéndose considerado un tiempo total de simulación de 1200 segundos.

### 10.2. Modelo de evacuación

Cuando se considera la seguridad de los ocupantes, o posible personal de servicios de rescate, se necesita usar modelos que sean capaces de simular procesos de evacuación. Estos modelos pueden ser simples cálculos a mano o métodos más avanzados de simulación computacional. La complejidad del modelo de evacuación puede variar, y los modelos se pueden categorizar de distintas formas. Una posible categorización es basada en cómo está representado el entorno edificado, es decir, como nodos y arcos, como una cuadrícula, o de forma continua. Otras categorizaciones incluyen el nivel de tratamiento del comportamiento humano. Los distintos tipos de modelos de evacuación tienen distintas ventajas y desventajas, y es importante escoger el modelo apropiado según la situación a simular.

En este proyecto se ha utilizado el software de simulación Pathfinder, desarrollado por Thunderhead Engineering. Pathfinder es un modelo de evacuación basado en agentes, que utiliza comportamientos de dirección para modelar el movimiento de los ocupantes. Consiste en tres módulos: una interfaz gráfica, el simulador, y un visor de resultados en 3D.

Pathfinder aporta dos opciones principales para el movimiento de los ocupantes: un modo SFPE y un modo de dirección. El modo SFPE implementa los conceptos incluidos en el

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [6]. Este es un modelo de flujo donde las velocidades de desplazamiento están determinadas por la densidad de ocupantes en cada habitación, y el flujo a través de las puertas está controlado por la anchura de ésta.

El modo de dirección está basado en la idea de los comportamientos de dirección inversos (Craig Reynolds “Steering Behaviors For Autonomous Characters” [Reynolds, 1999], Heni Ben Amor [Amor et. al., 2006]). El modo de dirección de Pathfinder permite que modos de comportamiento más complejos aparezcan naturalmente como producto de los algoritmos de movimiento, eliminando la necesidad de colas específicas en puertas y cálculos de densidades de ocupación.

El programa permite asignar a estos agentes perfiles de velocidad y tiempos de pre-movimiento, variables, según una función de distribución. También se le puede asignar distintas conductas, que dictan una secuencia de metas que el ocupante debe alcanzar en la simulación.

Para tratar la geometría del edificio, Pathfinder utiliza un modelo 3D. Dentro de este modelo geométrico, existe una malla de navegación definida como una superficie continua triangulada en 2D. Esta malla es una superficie irregular unilateral representada por triángulos adyacentes. La geometría puede ser importada desde el modelo de incendio creado en Pyrosim:

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

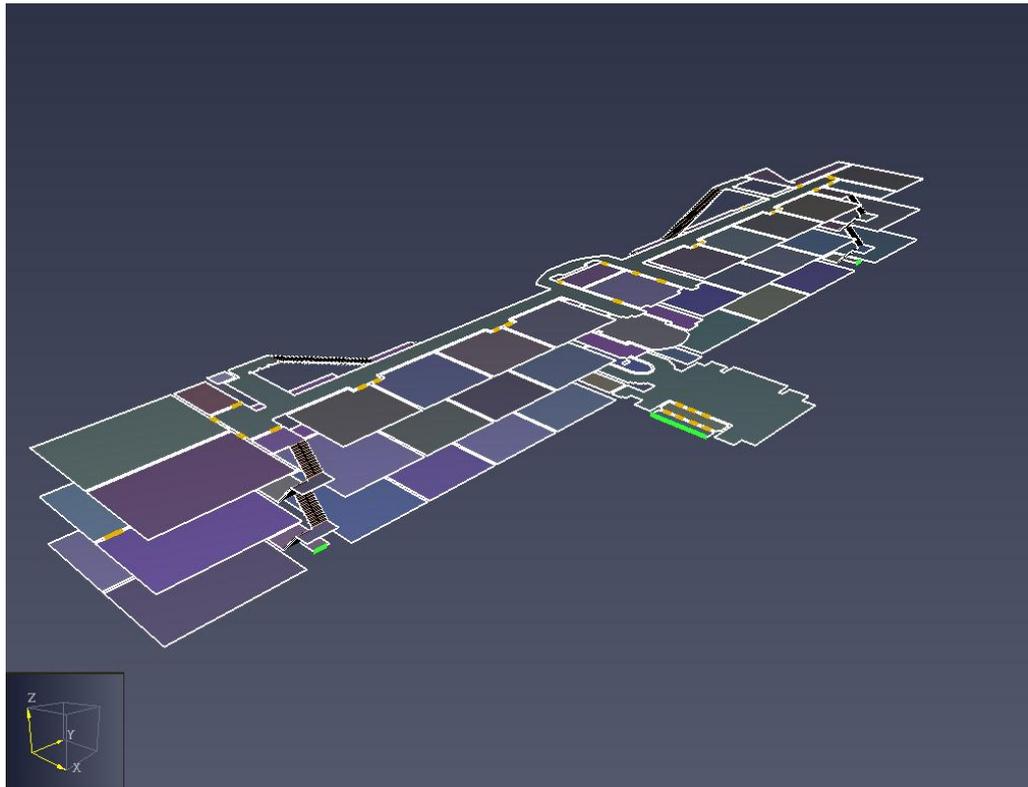


FIGURA 32- REPRESENTACIÓN EN PATHFINDER DEL MODELO DE LA SOLUCIÓN PRESCRIPTIVA

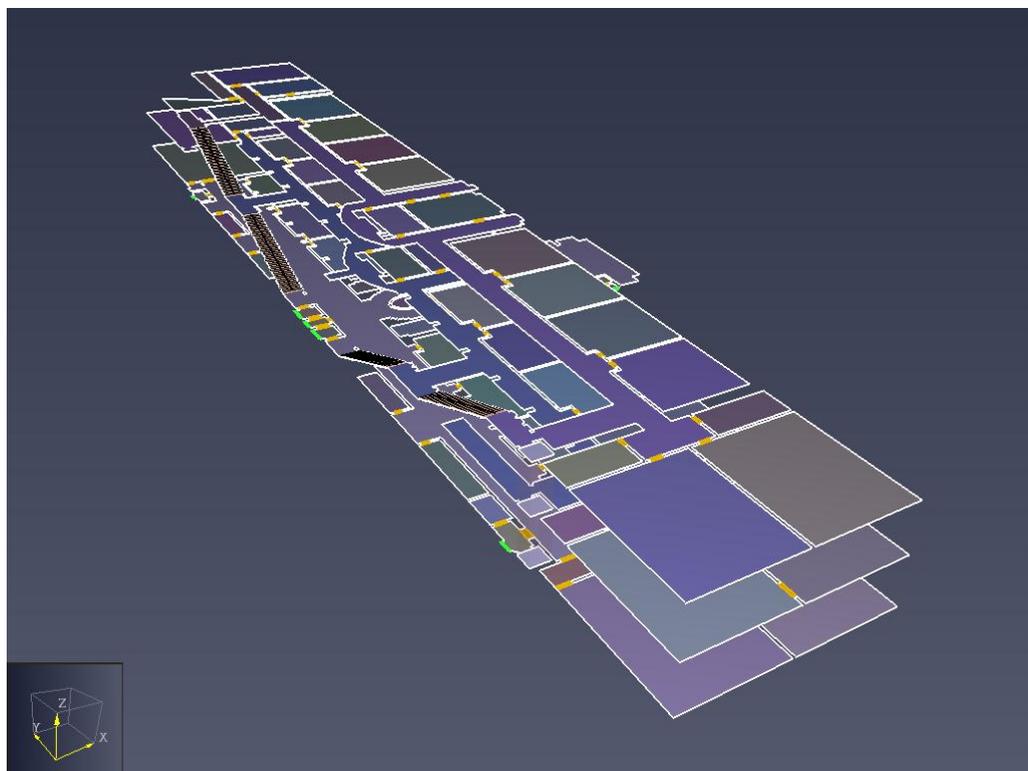


FIGURA 33 - REPRESENTACIÓN EN PATHFINDER DEL MODELO DE LA SOLUCIÓN BASADA EN PRESTACIONES

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Para este modelo, se crearon los perfiles de ocupantes indicados en el apartado (9.3), cada uno con unas velocidades de desplazamiento, tanto horizontales, como verticales en escaleras, que siguen una distribución normal, y se asignó un valor de forma aleatoria a cada ocupante. Se pobló el edificio de forma aleatoria hasta la ocupación estimada en función de la densidad del uso docente, de 250 personas en la planta baja, 194 en la primera planta y 165 en la segunda, y se asignaron los perfiles de velocidad según los porcentajes establecidos. El programa ajusta esos porcentajes según el número de ocupantes ya que no es posible hacer un reparto exacto. El reparto de perfiles finales en el modelo es el siguiente:

**TABLA 13 - REPARTO DE PERFILES DE OCUPANTES**

| <b>Perfil</b>      | <b>Porcentaje</b> |
|--------------------|-------------------|
| Mujeres <30 años   | 57.307            |
| Mujeres 30-50 años | 3.777             |
| Mujeres >50 años   | 3.777             |
| Hombres <30 años   | 27.915            |
| Hombres 30-50 años | 3.777             |
| Hombres >50 años   | 3.448             |

Se crearon también perfiles de comportamiento para añadir un tiempo de pre-movimiento a cada ocupante, también de forma aleatoria según una distribución normal, entre los valores escogidos anteriormente. El tiempo de pre-movimiento estimado, estaba comprendido entre 60 y 180 segundos, que son los valores mínimo y máximo de la distribución, siendo su media 120 segundos, y la desviación típica 25.8 segundos.

Para el caso de incendio 1, el incendio con origen en conserjería impide que los ocupantes puedan cruzar esa zona para acceder a la entrada principal del edificio, y así se simulan unas condiciones más exigentes de evacuación, en las que una de las salidas es anulada. Para ello, se crearon dos perfiles de comportamiento, ambos con la misma distribución normal de tiempos de pre-movimiento, pero con distintas tendencias de salida. El programa permite asignar las salidas a las que un ocupante puede optar a salir, de forma que, a los ocupantes del vestíbulo, solo se les permitió usar dicha salida, la S4, mientras que el resto de los ocupantes podían usar cualquier salida excepto esa misma.

Para el caso de incendio 2, en el que el incendio se situó en el aula 20 del segundo piso y se impide la circulación por una parte del pasillo, sencillamente se creó una obstrucción en el suelo, de forma que los ocupantes deban optar por otra salida.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Se realizaron 50 simulaciones de evacuación para cada caso, y para cada solución. En cada una, el programa permite asignar a cada uno de los ocupantes, valores distintos de pre-movimiento y velocidad de desplazamiento, según las distribuciones indicadas, mediante la función “randomize”, de manera que cada resultado sea distinto, y cumplir con el enfoque probabilista.

Precisar que el tiempo obtenido en las simulaciones es el tiempo de evacuación, pero no es el RSET, ya que para eso hay que añadirle los tiempos de detección y aviso.

Con los resultados de ambos modelos, el de incendio y el de evacuación, se compararán el RSET con ASET, el tiempo requerido para evacuar frente al disponible en el que se rebasan los límites de sostenibilidad establecidos en los criterios de prestaciones. Si el RSET es mayor, la evacuación no se completará de forma segura, y el objetivo de seguridad no se habrá cumplido.

## 11. EVALUACIÓN DEL DISEÑO

El plan de diseño de seguridad debe ser evaluado mediante un análisis ingenieril utilizando los métodos de ingeniería seleccionados, para determinar si los criterios de prestaciones se han alcanzado para dichos escenarios de incendio de diseño. Esta evaluación cuantifica las prestaciones del plan de diseño de seguridad contra incendios. Es necesario comparar los resultados de la evaluación de los diseños de protección en caso de incendio para cada caso, con los criterios de prestaciones de los objetivos de seguridad relevantes. Si la comparación no es satisfactoria para uno o varios de los objetivos de seguridad o de los escenarios de diseño, se puede tomar una de las siguientes respuestas:

- El diseño del sistema de protección contra incendios debe ser modificado para que cumpla con los criterios de prestaciones que no son cumplidos por el caso original. Cualquier cambio realizado en el plan de diseño de seguridad en caso de incendios debe resultar en una repetición del procedimiento desde el apartado 8 hasta el 11.
- Cuando el objetivo bajo consideración es voluntario, es posible cambiar el objetivo o los criterios de prestaciones con la aprobación de las partes afectadas. Esto debe resultar en una repetición del procedimiento desde el apartado 7 hasta el 11.
- Para algunas situaciones puede ser necesario revisar el alcance del proyecto, en tal caso, el proceso debe volver al apartado 3.

### 11.1. Resultados de la solución prescriptiva

#### 11.1.1. Escenario de Incendio 1 – Incendio en el recinto de conserjería.

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos en las simulaciones computacionales, para el primer escenario de incendio, situado en la zona de conserjería. Se evaluarán según los límites establecidos en los criterios de prestaciones, y puesto que se han establecido un número considerable de puntos de medición, los datos se representan agrupados por plantas, y por escaleras, para una mejor visualización. Los resultados de evacuación se representarán de la misma forma para posibilitar la comparación entre el tiempo de evacuación

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

y las condiciones a las que los ocupantes están sometidos en función del tiempo. La idea es comprobar si la evacuación de los ocupantes se completa antes de que las condiciones de sostenibilidad caigan por debajo de los límites establecidos.

Como se verá a continuación, de los 6 criterios de prestaciones evaluados el único que sobrepasa el límite establecido en alguno de los casos estudiados es la visibilidad. El resto de los criterios no llegan a valores críticos o apenas se ven afectados por las manifestaciones del incendio. Los siguientes apartados se focalizarán en los humos generados, el nivel de visibilidad y los tiempos de evacuación, ya que el resto de los criterios se cumplirán siempre y no serán una amenaza para los ocupantes. Los resultados completos del resto de parámetros se recogen en el Anexo A.

En lo que respecta a la evolución del humo en el conjunto del edificio, la Figura 34 muestra como el humo asciende y se acumula en el depósito superior, pero el sistema de extracción de humos mediante exutorios realiza su función y aunque inicialmente la capa de humo crece, enseguida se estabiliza en unos valores aceptables sin llegar a ocupar las zonas habitables.

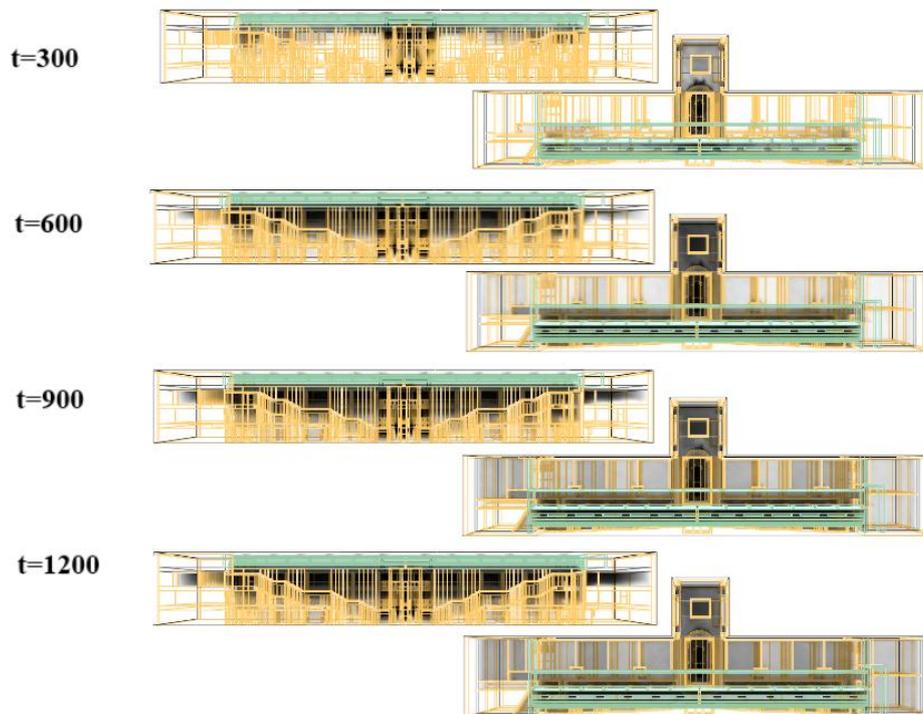


FIGURA 34 - EVOLUCIÓN DEL HUMO EN EL EDIFICIO. SOLUCIÓN CTE, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

En las figuras 35 a 38, se ven los valores de visibilidad en los slices en  $x=1.25, 4.25, 8$  y  $10$  m. En la escala de colores, se muestra en negro el valor del límite de visibilidad de 10 metros que, como se puede ver, solo se supera en la zona del techo, en el slice en  $x=4.25$ , justo encima del pasillo de la planta baja, con lo que no afectará a los ocupantes.

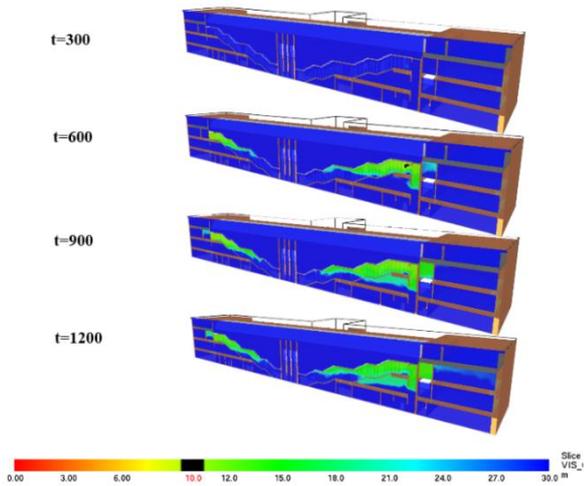


FIGURA 35- VISIBILIDAD EN SLICE  $x=1.25$ . CTE, CASO 1.

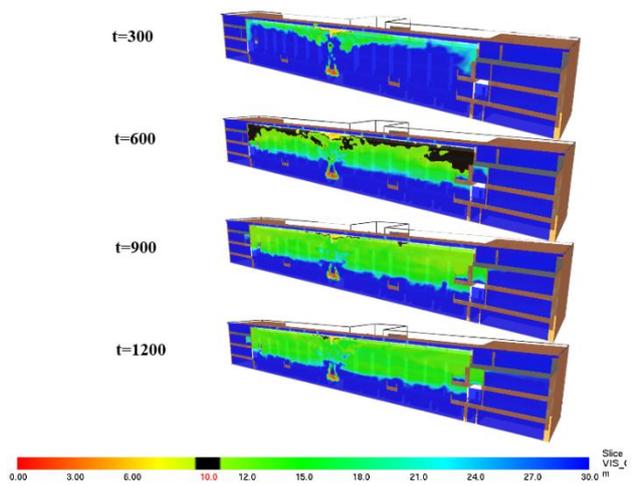


FIGURA 36 - VISIBILIDAD EN SLICE  $x=4.25$ . CTE, CASO 1.

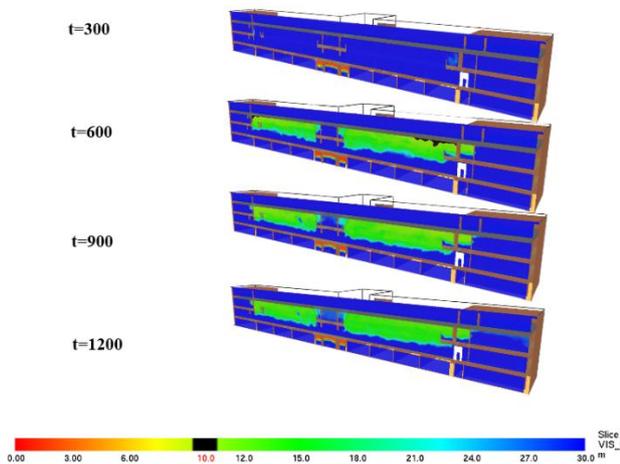


FIGURA 37 – VISIBILIDAD EN SLICE  $x=8$ . CTE, CASO 1.

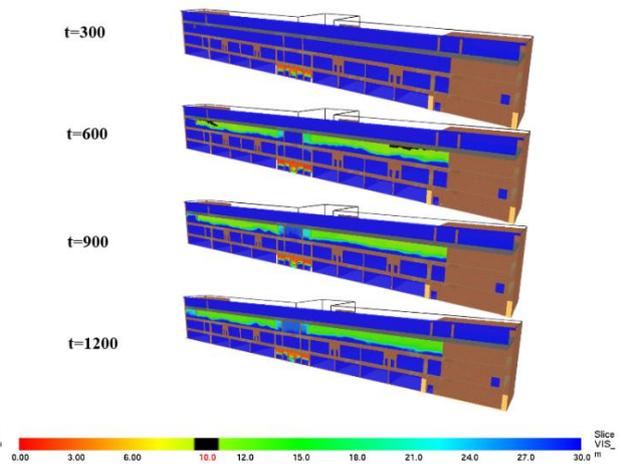


FIGURA 38 - VISIBILIDAD EN SLICE  $x=10$ . CTE, CASO 1.

A continuación, se presentan las gráficas de los valores obtenidos en los devices de medida. Como se puede apreciar en la gráfica de la segunda planta (figura 39), la visibilidad descende por la acumulación de humos, pero se estabiliza por encima del límite en todo momento. Aunque aparecen un par de puntos que parece que caen por debajo del límite, son del device “C2”, colocado en el punto central del pasillo del segundo piso, justo en el ascenso

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

del penacho de humos, donde hay flujos turbulentos de humo que hacen variar mucho los resultados.

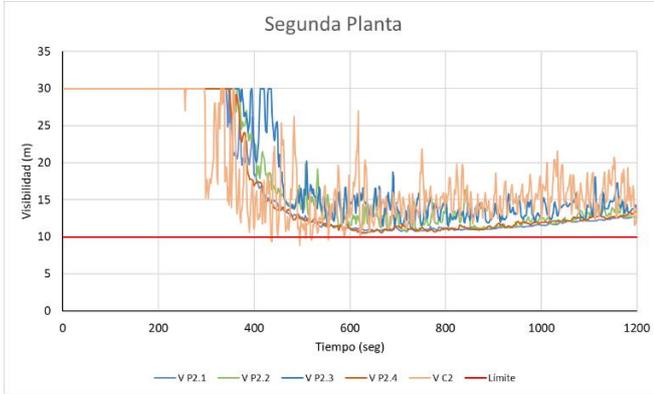


FIGURA 39 - VISIBILIDAD EN PLANTA 2. CTE, CASO 1.

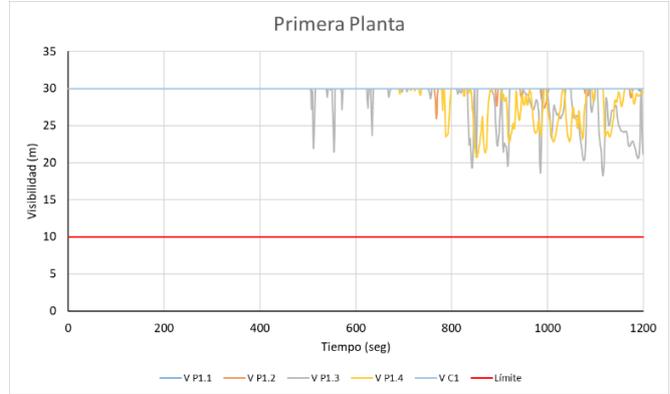


FIGURA 40 - VISIBILIDAD EN PLANTA 1. CTE, CASO 1.

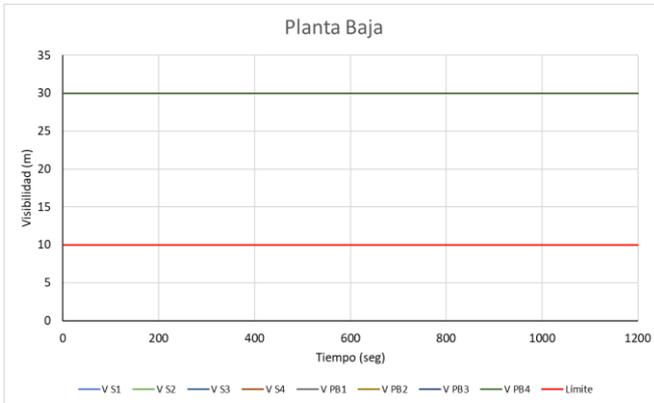


FIGURA 41- VISIBILIDAD EN LA PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

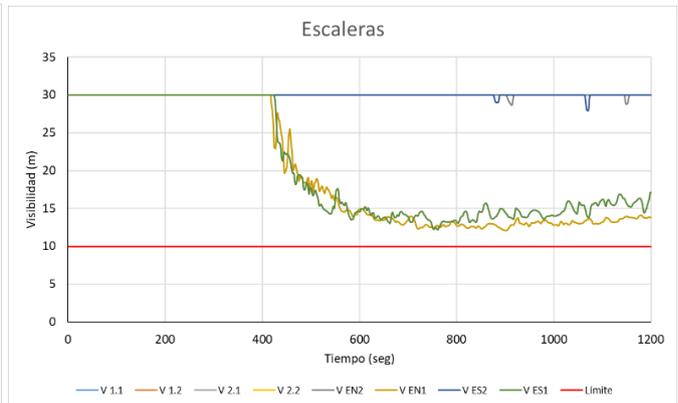


FIGURA 42 - VISIBILIDAD EN ESCALERAS. CTE, CASO 1.

En el resto de las plantas apenas hay influencia del humo, en la primera planta (figura 40) apenas afecta a la visibilidad, y la planta baja (figura 41) permanece intacta. En el tramo de escaleras del segundo al primer piso (figura 42), la visibilidad desciende de forma parecida al resto de la segunda planta, y se vuelve a estabilizar por encima del límite.

Se puede decir que la solución cumple con los criterios de prestaciones y se garantiza la seguridad de los ocupantes en todo momento.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

En el caso de los resultados de las simulaciones de evacuación, de cada simulación en Pathfinder, se obtiene un tiempo de evacuación. Como se ha indicado, a este tiempo habrá que añadirle el tiempo previo estimado entre 2 y 5 minutos para obtener el  $t_{RSET}$ . Los distintos resultados se expresan mediante una distribución normal (figura 43), y se tomará el percentil 95 como valor representativo para comparar con el  $t_{ASET}$ .

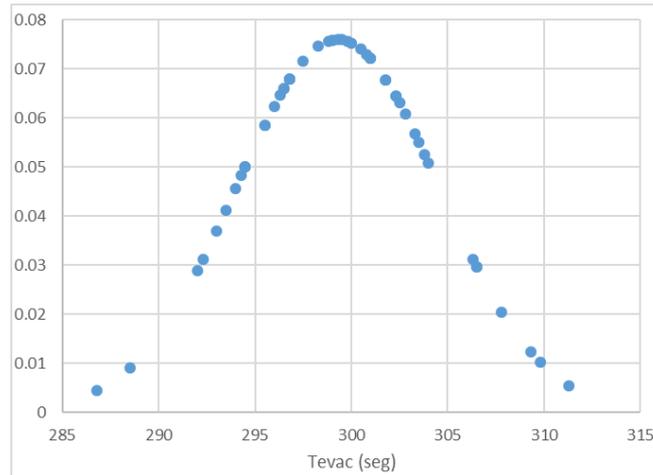


FIGURA 43 - TIEMPOS DE EVACUACIÓN DE LA SOLUCIÓN CTE, CASO 1.

TABLA 14 - TIEMPOS DE EVACUACIÓN, RSET MÍN Y RSET MÁX DE SOLUCIÓN CTE, CASO 1.

|           | <b>Promedio</b> | <b>Percentil 95</b> | <b>Desviación</b> |
|-----------|-----------------|---------------------|-------------------|
| Tevac     | 299.29          | 308.63              | 5.25              |
| tRSET min | 419.29          | 428.63              |                   |
| tRSET max | 599.29          | 608.63              |                   |

A continuación, se muestra la ocupación de cada planta y de las escaleras, en función del tiempo. Se presentan dos curvas de evacuación: la curva naranja representa según el  $t_{RSET}$  mínimo, con un  $t_{warn}$  de 2 minutos, mientras que la curva roja, representa el caso más conservador, un  $t_{RSET}$  máximo con un  $t_{warn}$  de 5 minutos.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

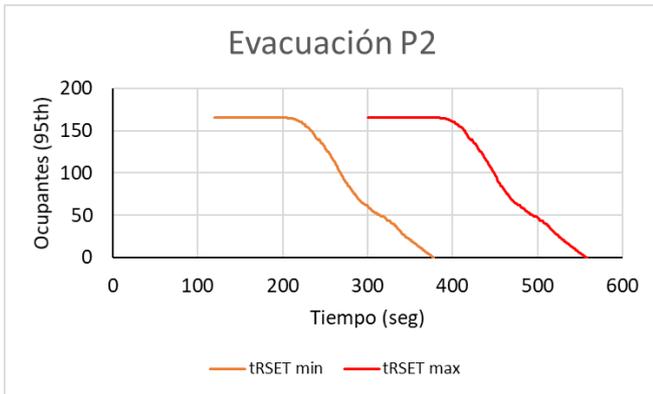


FIGURA 44- EVACUACIÓN PLANTA 2. CTE, CASO 1.

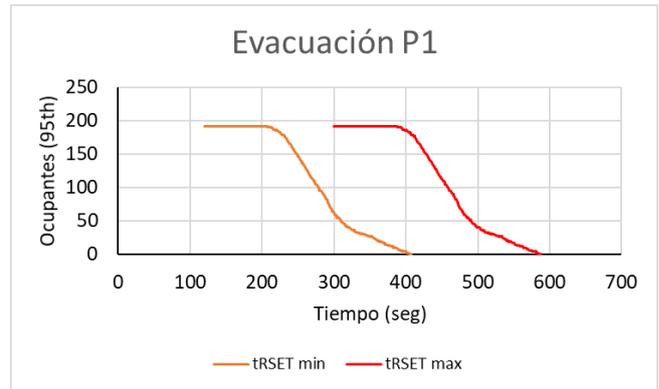


FIGURA 45- EVACUACIÓN PLANTA 1. CTE, CASO 1.

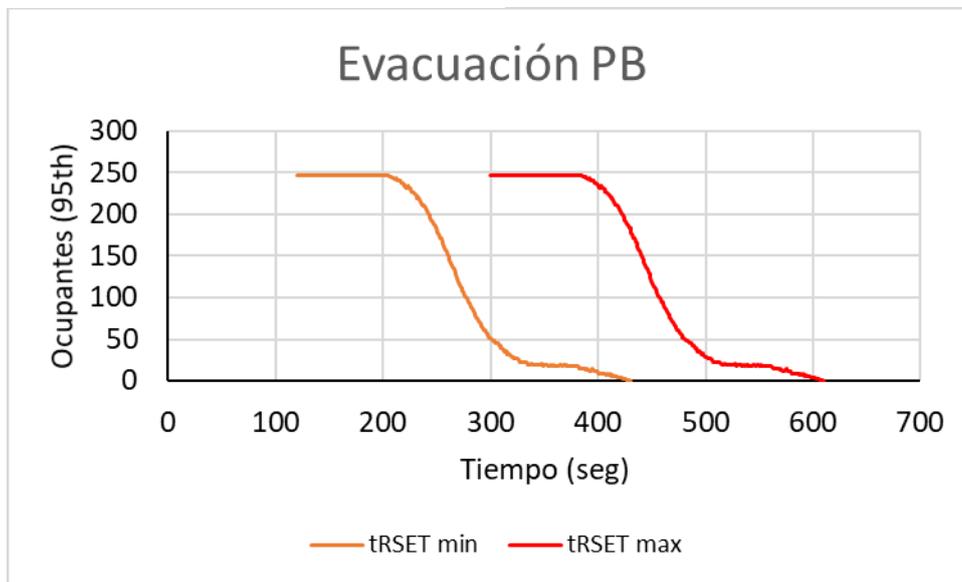


FIGURA 46 - EVACUACIÓN EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

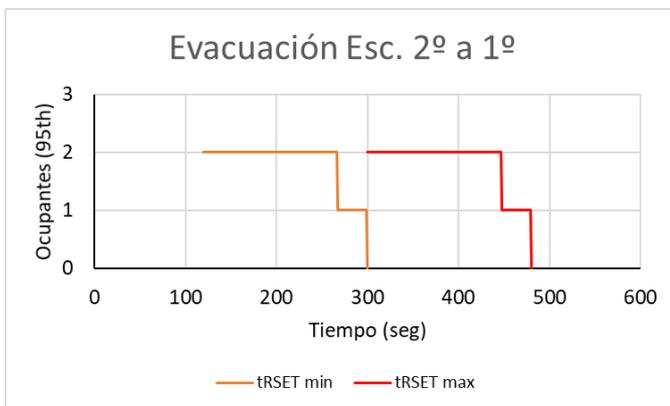


FIGURA 47 – EVAC. DEL 2º AL 1º. CTE, CASO 1.

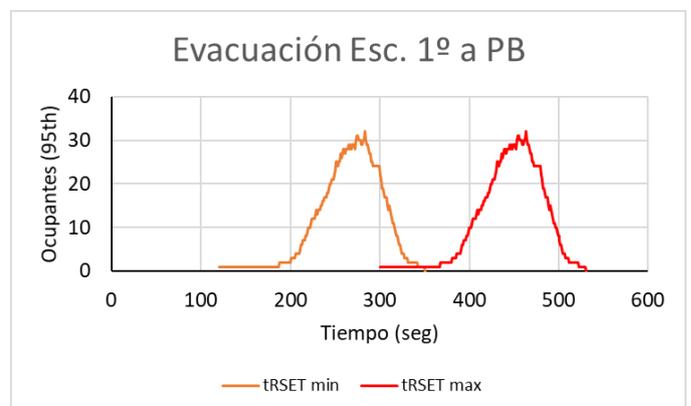
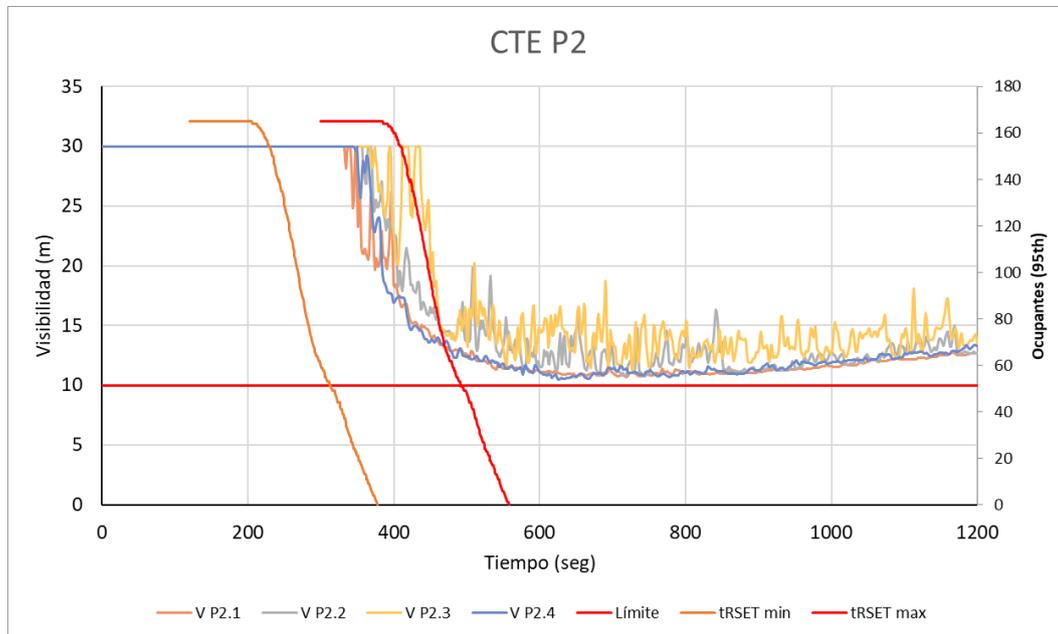


FIGURA 48 - EVAC. DEL 1º A LA PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

A la vista de los resultados, el tiempo total requerido para la evacuación ronda los 600 segundos. Se van a comparar estas curvas de evacuación con los resultados de visibilidad anteriores.



**FIGURA 49 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.**

En la figura 49 se representa la visibilidad en la segunda planta frente a la ocupación, en función del tiempo. La gráfica tiene dos ejes verticales, uno representa la visibilidad, en metros, de los puntos de medida marcados a lo largo del pasillo del segundo piso, así como el límite de 10 metros establecido; en el otro eje, se representan los ocupantes presentes en esa planta, obtenidos de las simulaciones de evacuación. Se presentan las dos curvas de evacuación mencionadas, según los distintos  $t_{warn}$  asumidos.

Como se puede ver, los valores de visibilidad no caen por debajo del límite de 10 metros en ningún momento, con lo que la evacuación puede realizarse de forma segura. El sistema de extracción de humos ayuda a mantener unos niveles tolerables.

En lo que respecta a los niveles de visibilidad en la primera planta, la Figura 50 muestra la comparativa con los tiempos de evacuación. Se observa como en este caso también la visibilidad apenas desciende en la primera planta gracias al sistema de extracción de humos, y los ocupantes pueden evacuar de forma segura.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

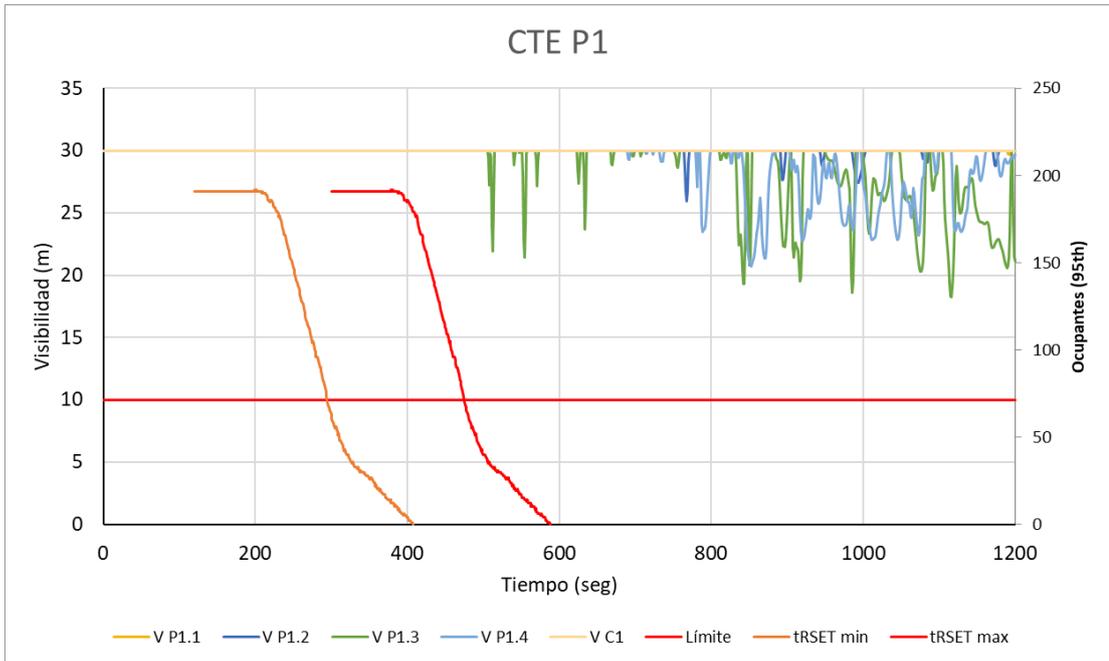


FIGURA 50 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN PRIMERA PLANTA. CTE, CASO 1.

En lo que respecta a los niveles de visibilidad en la planta baja y su comparación con los tiempos de evacuación (Figura 51). Como era de esperar, si la primera planta está libre de humos, la planta baja también lo está. Ni los puntos del pasillo central, ni las cuatro salidas del edificio se ven afectadas.

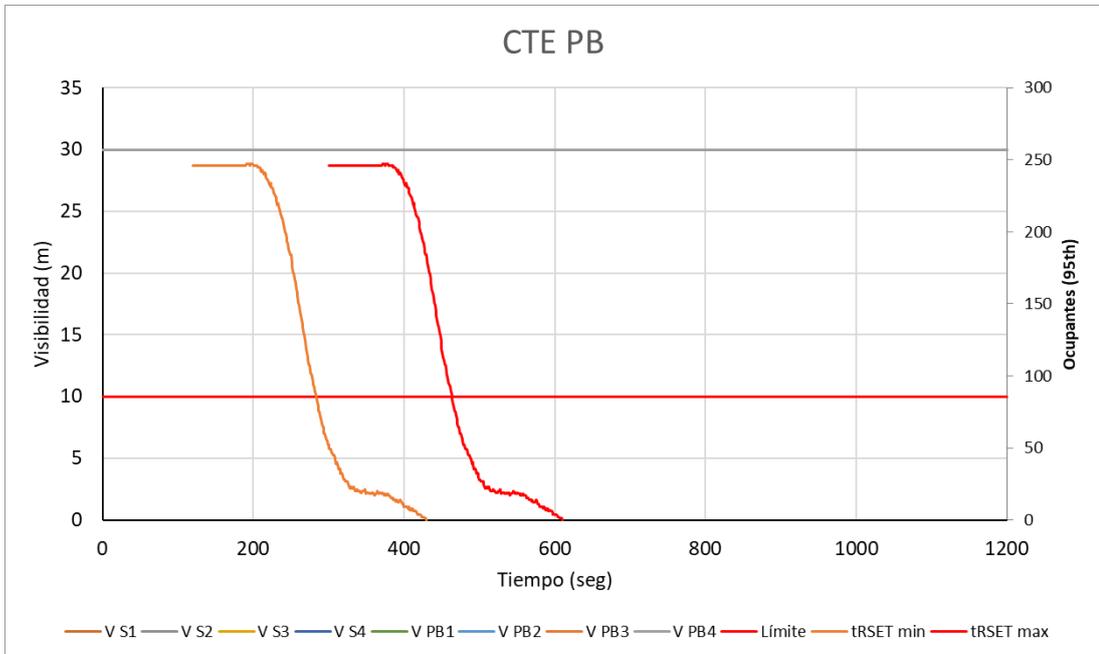
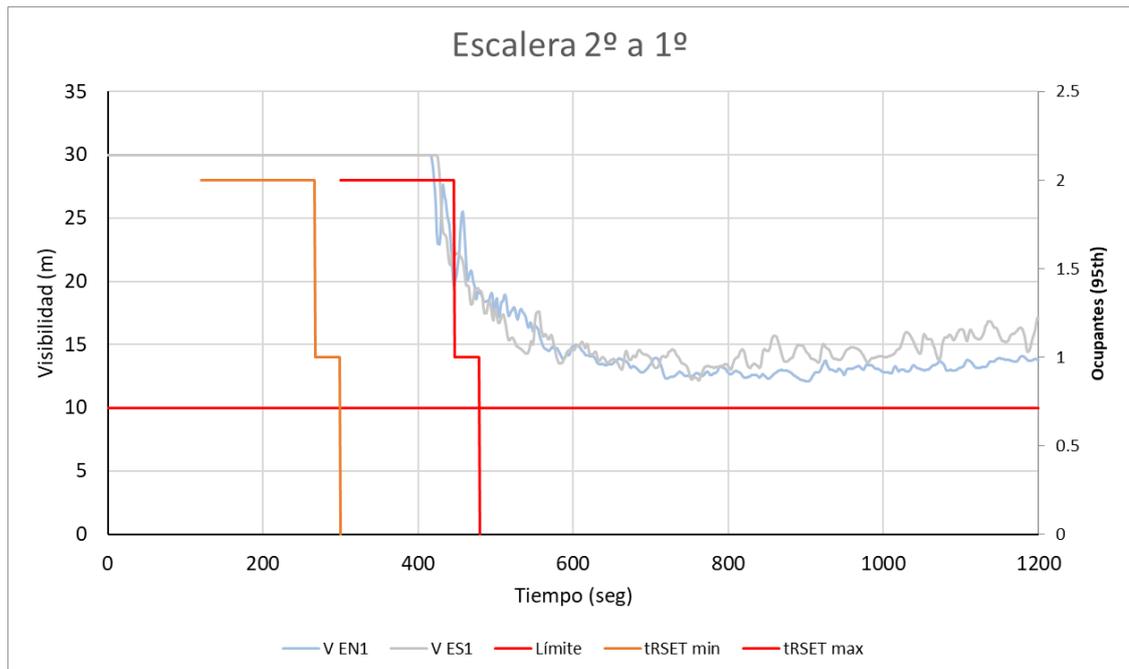


FIGURA 51 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

A continuación, se exponen mediciones en las escaleras laterales del edificio, primero en el tramo que baja de la segunda a la primera planta (Figura 52). La visibilidad desciende, pero se mantiene por encima del límite establecido. Hay que resaltar que este tramo de escaleras apenas fue utilizado, indicado por la baja ocupación de 1 o 2 personas presentes en todo momento. Esto es debido a que los ocupantes tienden a escoger las escaleras interiores de los sectores 1 y 3 en vez de las laterales.



**FIGURA 52 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN ESCALERAS DEL 2º AL 1º. CTE, CASO 1.**

En el siguiente tramo de escaleras, de la primera planta a la planta baja, se tienen los siguientes resultados (Figura 53). De nuevo, en las plantas inferiores, apenas hay influencia del humo y la visibilidad no se ve afectada. En este tramo, la curva de ocupación aumenta y luego disminuye. Esto es debido a que inicialmente las escaleras están libres, hasta que comienza la evacuación y llega el flujo de personas de las plantas superiores.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

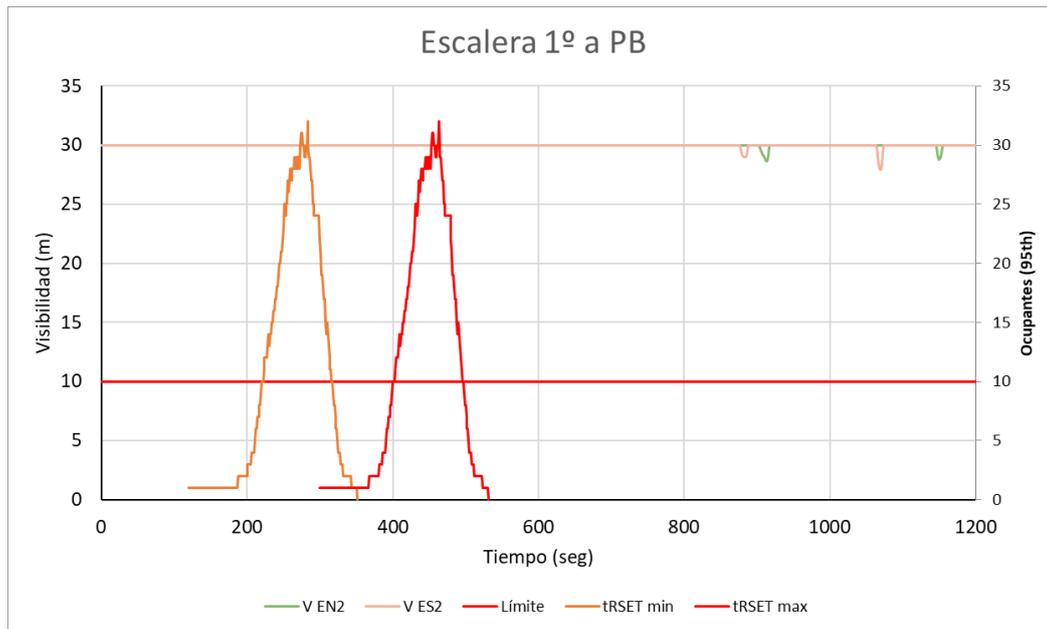


FIGURA 53 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN ESCALERAS DEL 1º A LA PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

En resumen, esta solución garantiza un nivel de seguridad suficiente para permitir la evacuación de los ocupantes a lo largo de todos los recorridos, incluso en la hipótesis más desfavorable para un  $t_{warn}$  de 5 minutos.

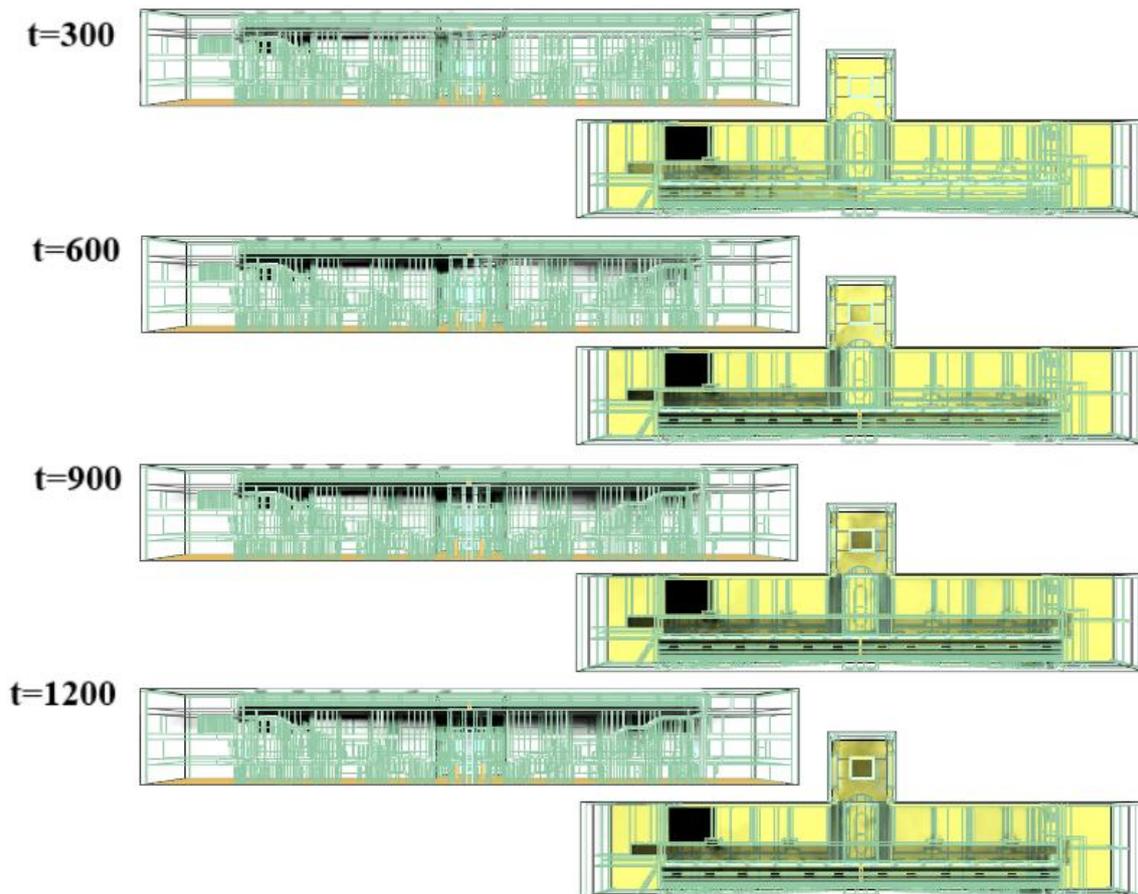
En conclusión, para este caso de incendio, la solución prescriptiva aporta un nivel de seguridad suficiente, hasta en las estimaciones más desfavorables de tiempos de evacuación, lo cual era de esperar ya que se ha elaborado según las regulaciones del Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio. El criterio de prestaciones que va a ser más desafiante es la visibilidad, que, aunque cumple en todo momento, es el que más se aproxima a los valores límites.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

**11.1.2. Escenario de Incendio 2 – Incendio en el aula 20 del segundo piso.**

En este segundo caso, se analiza el escenario de incendio en el aula 20 del segundo piso, que bloqueará el acceso a la escalera norte de evacuación. De nuevo se presentan los datos de los criterios de prestaciones agrupados por plantas.

Para el caso de la evolución del humo en el conjunto del edificio, la Figura 54 muestra como las condiciones del incendio en general van a ser mucho menos severas que en el escenario 1



**FIGURA 54 - EVOLUCIÓN DEL HUMO EN EL EDIFICIO. CTE, CASO 2.**

Esto se puede ver también en los siguientes slices en  $x=1.25$ ,  $4.25$ ,  $8$  y  $10$  metros, en las figuras 55 a 58

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

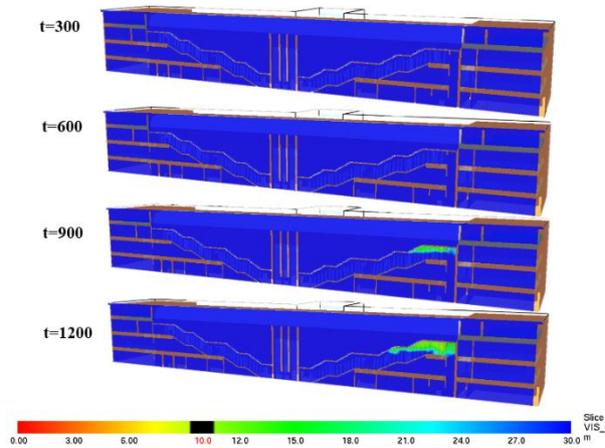


FIGURA 55 - VISIBILIDAD EN SLICE X=1.25. CTE, CASO 2.

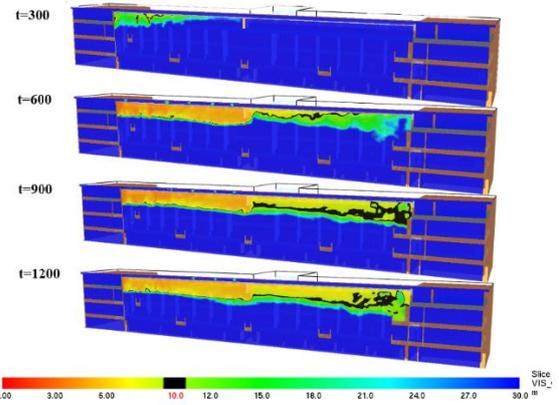


FIGURA 56 - VISIBILIDAD EN SLICE X=4.25. CTE, CASO 2.

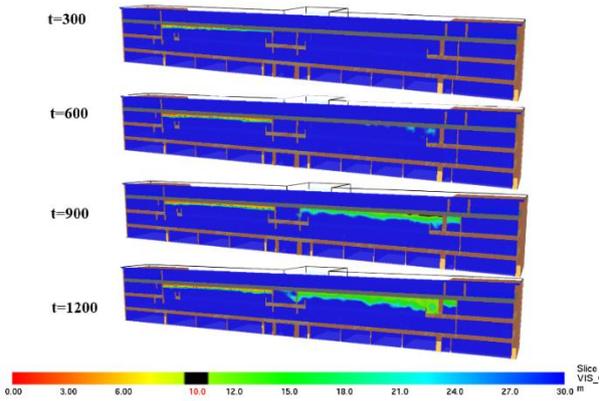


FIGURA 57 - VISIBILIDAD EN SLICE X=8. CTE, CASO 2.

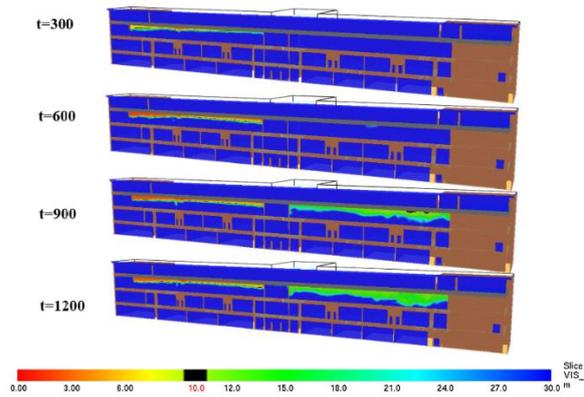


FIGURA 58 - VISIBILIDAD EN SLICE X=10. CTE, CASO 2.

Los resultados en general son mejores que en el escenario 1, aunque vuelve a sobrepasarse el límite de 10 m en algunos instantes en el techo encima del pasillo de la planta baja, lejos de los ocupantes.

En cuanto a las mediciones de los devices, solo se van a incluir los de la segunda planta ya que son los únicos en los que se detecta algún descenso de la visibilidad, el resto de las plantas permanecen intactas (figura 59).

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

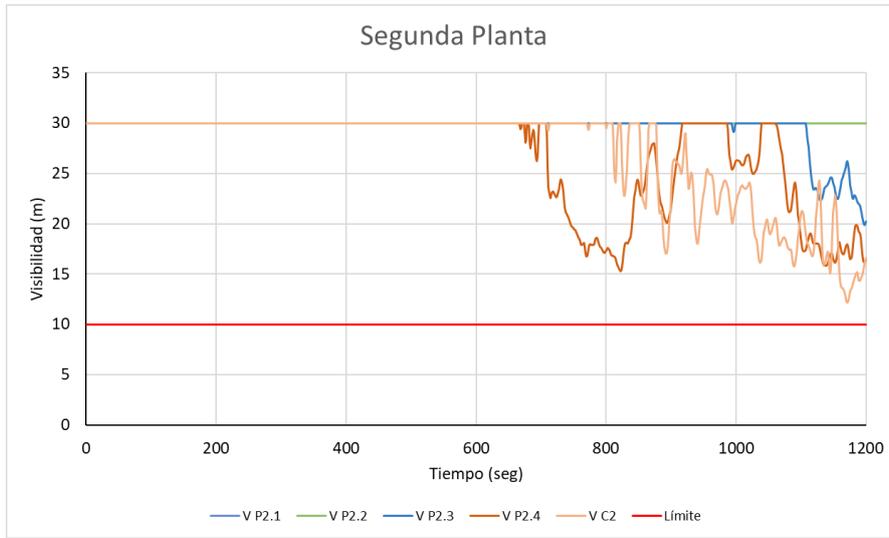


FIGURA 59 - VISIBILIDAD EN LA SEGUNDA PLANTA. SOLUCIÓN CTE, CASO 2.

En lo que respecta a los resultados de las simulaciones de evacuación, en este escenario, los tiempos de evacuación son ligeramente mayores al anterior, sobre medio minuto más que en el escenario 1. De nuevo se muestra una distribución normal de tiempos de evacuación obtenidos en las 50 simulaciones realizadas.

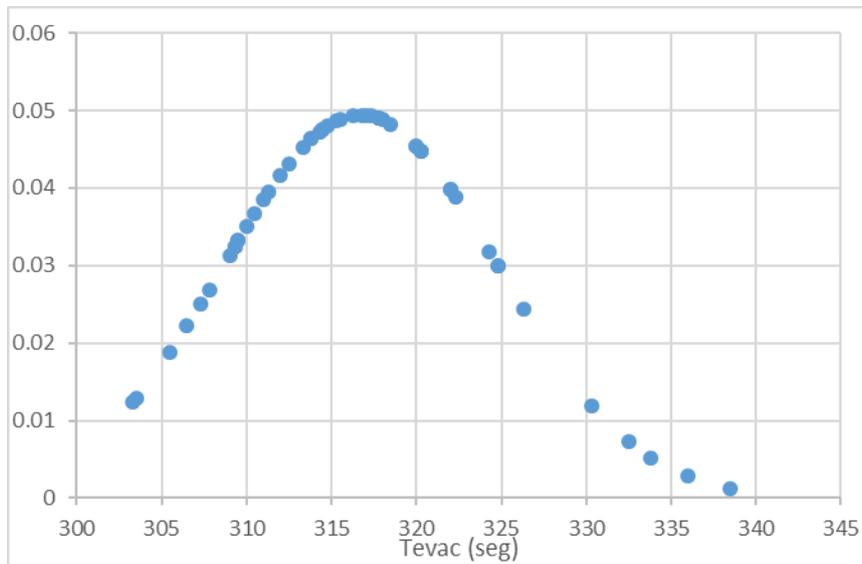


FIGURA 60 - TIEMPOS DE EVACUACIÓN DE LA SOLUCIÓN CTE, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

TABLA 15 - TIEMPOS DE EVAC. RSET MÍN Y RSET MÁX DE LA SOLUCIÓN CTE, CASO 2.

|                  | Promedio | Percentil 95 | Desviación |
|------------------|----------|--------------|------------|
| <b>Tevac</b>     | 316.70   | 333.28       | 8.15       |
| <b>tRSET min</b> | 436.70   | 453.28       |            |
| <b>tRSET max</b> | 616.70   | 633.28       |            |

La ocupación de cada planta durante la evacuación será la mostrada en las Figuras 61-65.

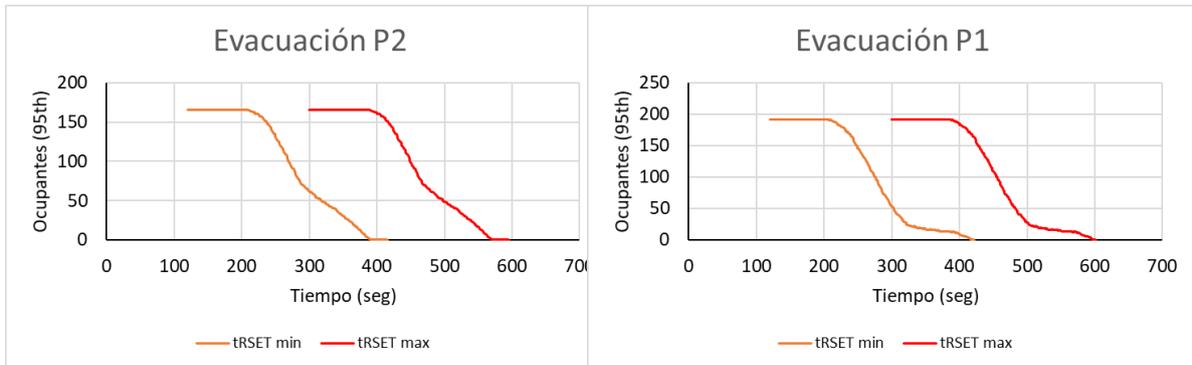


FIGURA 61 - EVACUACIÓN EN PLANTA 2. CTE, CASO 2. FIGURA 62 - EVACUACIÓN EN PLANTA 1. CTE, CASO 2.

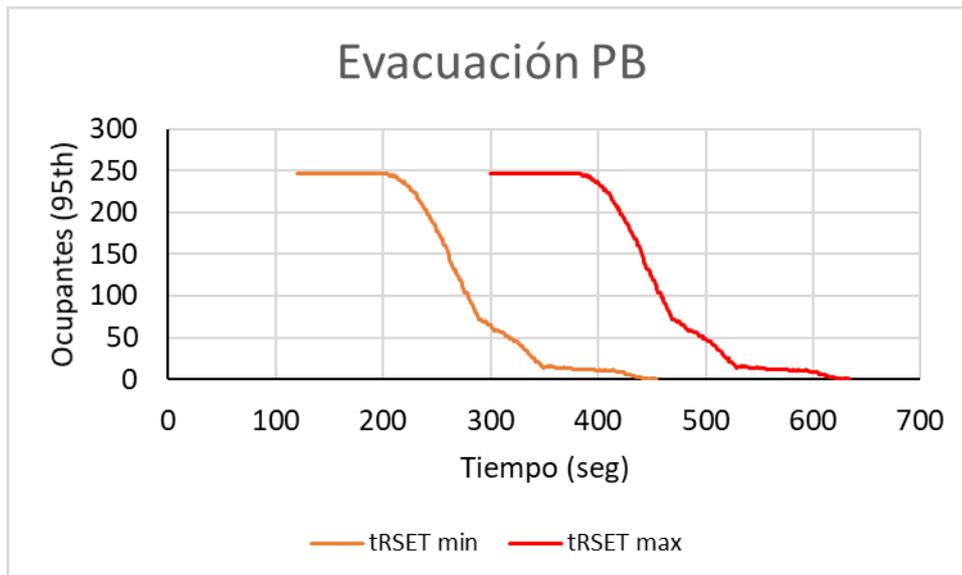


FIGURA 63 - EVACUACIÓN EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

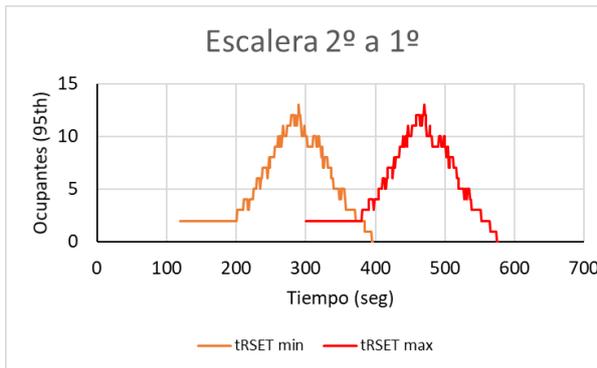


FIGURA 64 - EVAC. DEL 2º AL 1º. CTE, CASO 2.

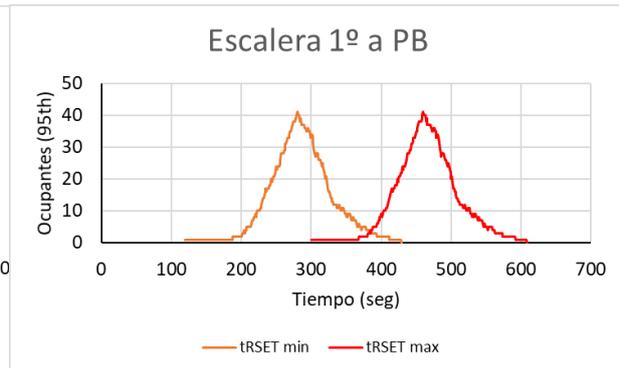


FIGURA 65 - EVAC. DEL 1º A PLANTA BAJA. CTE, CASO 2.

Se puede observar cómo los tiempos de evacuación son mayores que en el escenario anterior, alrededor de medio minuto. Esto es debido a que los ocupantes del segundo piso tienen que recorrer todo el pasillo de la segunda planta para acceder a las otras escaleras, debido al bloqueo que provoca el incendio. Esto se puede apreciar en los tramos de escaleras del segundo al primer piso (figura 64), que tienen una utilización bastante mayor que en el caso anterior, debido a que las escaleras interiores de los sectores 1 y 3 ya no son tan accesibles. A pesar de este aumento en el tiempo de evacuación, los ocupantes pueden abandonar el edificio sin problemas, como se ve en la figura 66. En la segunda planta, la más cercana al depósito de humos, los valores de visibilidad están muy lejos de ser peligrosos.

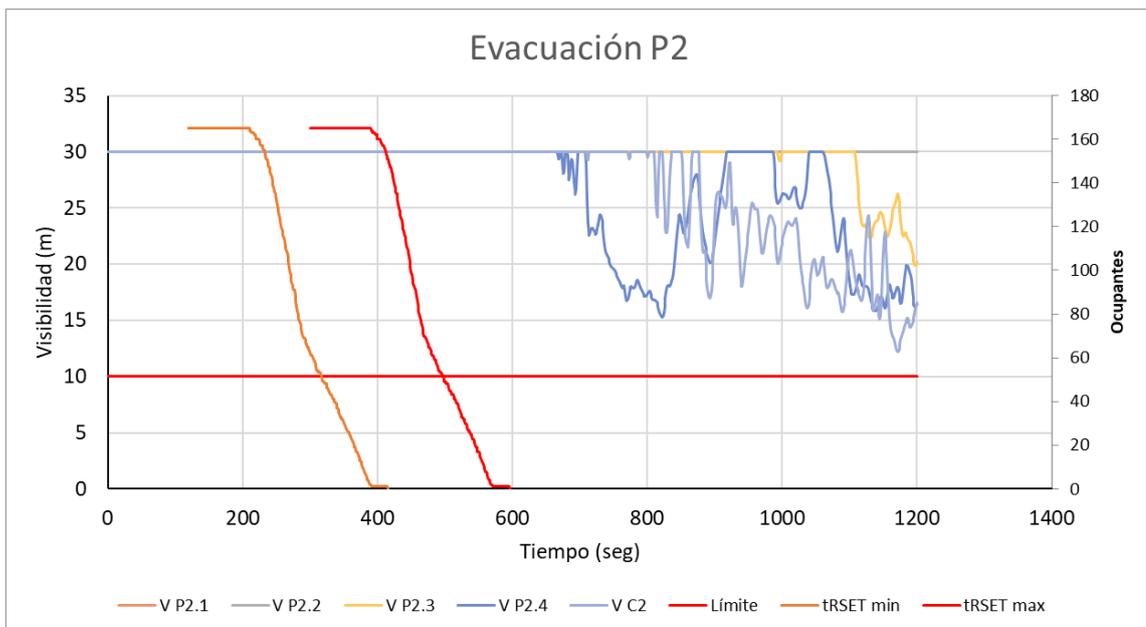


FIGURA 66 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN LA SEGUNDA PLANTA. CTE, CASO 2.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Al igual que pasaba en el caso anterior, en las escaleras se ve como aumenta la ocupación al recibir el flujo de personas de los pisos superiores. En este escenario, los niveles de visibilidad son menos restrictivos que en el escenario de incendio 1.

Como conclusión, en este escenario de incendio, a pesar de que los tiempos de evacuación son mayores debido al bloqueo de una de las escaleras en el segundo piso, y de que los ocupantes de esta planta deben permanecer más tiempo en ella para alcanzar una salida alternativa, los niveles medidos de los criterios de prestaciones son menos severos que en el escenario 1, y no suponen un peligro para los ocupantes. Esto probablemente se debe a que, en el primer escenario, el incendio en la planta baja tiene que ascender hasta la cubierta desde la planta baja, recorriendo una altura de 13 m, mientras que, en el segundo piso, recorre mucha menos distancia. Por lo tanto, la entrada de masa de aire en el penacho de los humos es menor, y a su vez la capa de humos que se deposita en la cubierta.

En resumen, esta solución presenta unos niveles de seguridad aceptables en todos los escenarios de incendio, y tanto para los tiempos de detección más optimistas como para los más conservadores. Por tanto, la solución basada en prestaciones servirá como referencia para comparar con la solución alternativa basada en prestaciones.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

## 11.2. Resultados de la solución alternativa.

### 11.2.1. Escenario de Incendio 1 – Incendio en el recinto de conserjería.

#### 11.2.1.1. Prestaciones de la solución Alternativa A

Primero se comprobó el comportamiento del edificio, con su estado inicial, lo que se va a denominar “solución Alternativa A”, es decir, sin aplicar las medidas propuestas en la solución alternativa basada en prestaciones, que a su vez se denominará “Solución Alternativa B”. A pesar de que en esta solución A se van a alcanzar unas manifestaciones de incendio peores que en la solución CTE, como se verá a continuación, de nuevo el único criterio de prestaciones que no se cumple es la visibilidad y el resto de los criterios siguen quedando lejos de los límites de sostenibilidad, y por tanto, estarán en el Anexo B.

La Figura 67 muestra la evolución del humo en el conjunto del edificio.

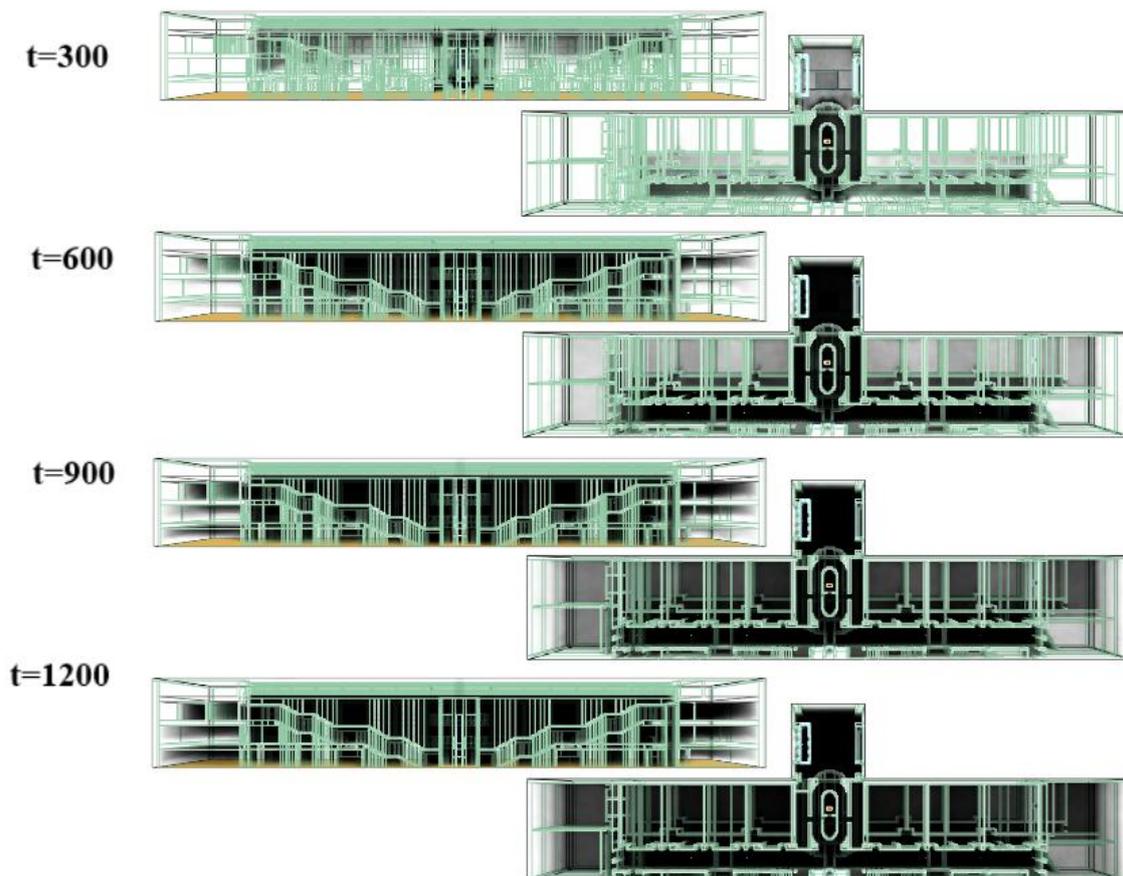


FIGURA 67 - EVOLUCIÓN DEL HUMO EN EL EDIFICIO. SOLUCIÓN ALTERNATIVA A, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

En este caso la visibilidad cae rápidamente y se sobrepasa el límite de sostenibilidad en todas las plantas y escaleras. El edificio se llena de humo completamente como se puede ver en los slices siguientes en  $x=1.25, 4.25, 8, 10$  m en las figuras 68 a 71:

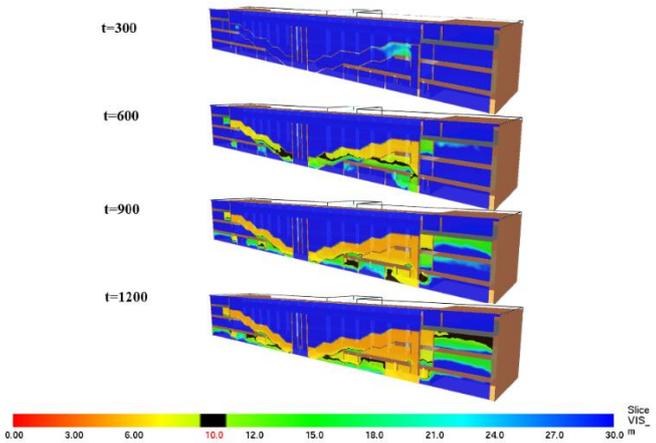


FIGURA 68 - VISIBILIDAD EN SLICE  $x=1.25$ . ALTERN. A, CASO 1.

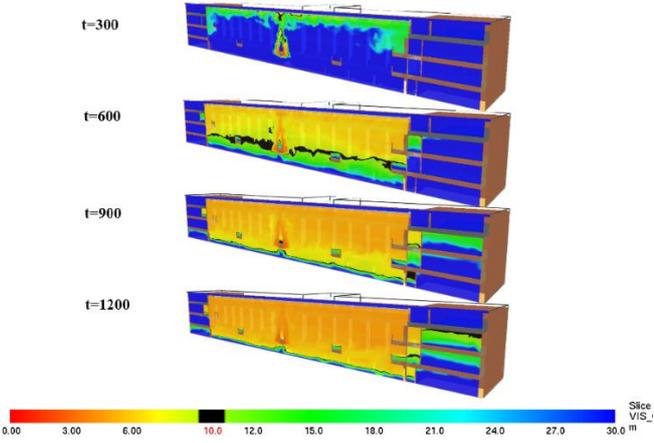


FIGURA 69 - VISIBILIDAD EN SLICE  $x=4.25$ . ALTERN. A, CASO 1.

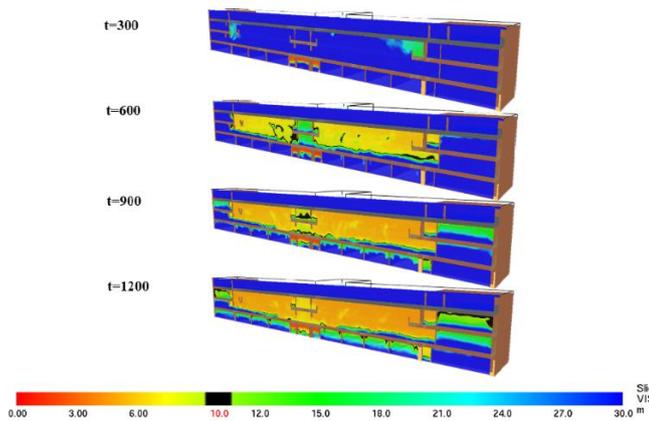


FIGURA 70 - VISIBILIDAD EN SLICE  $x=8$ . ALTERN. A, CASO 1.

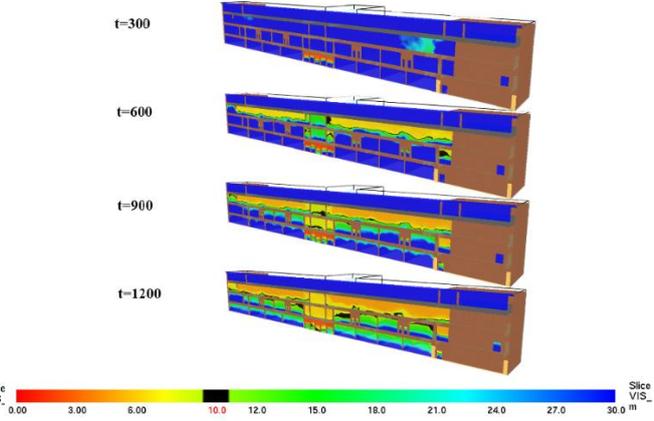


FIGURA 71- VISIBILIDAD EN SLICE  $x=10$ . ALTERN. A, CASO 1.

Al no haber un sistema de extracción de humos, no para de acumularse humo en el atrio, de manera que entre los 400 y los 600 segundos se va sobrepasando el límite de 10 m de visibilidad en todas las plantas y escaleras de forma descendente. En este caso sí que la visibilidad va a ser una amenaza para los ocupantes y habrá que compararla con los tiempos requeridos para la evacuación. En las figuras 72 a 75 de las mediciones de los devices se puede apreciar este resultado. En todas las plantas del edificio se acaba sobrepasando el límite establecido.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

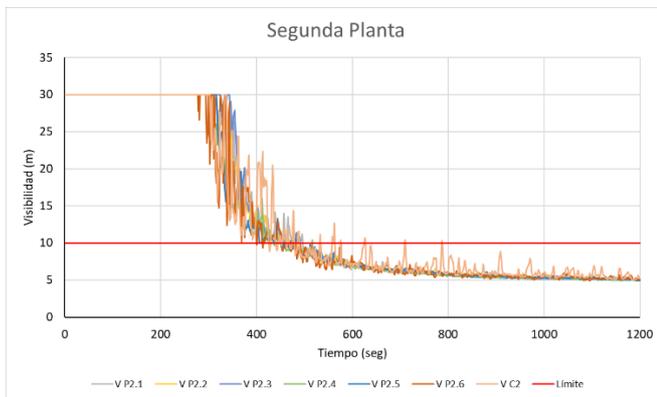


FIGURA 72 - VISIBILIDAD EN PLANTA 2. ALTERN. A, CASO 1.

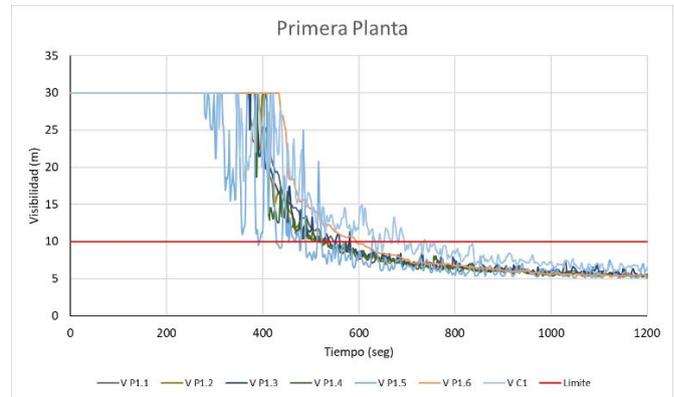


FIGURA 73 - VISIBILIDAD EN PLANTA 1. ALTERN. A, CASO 1.

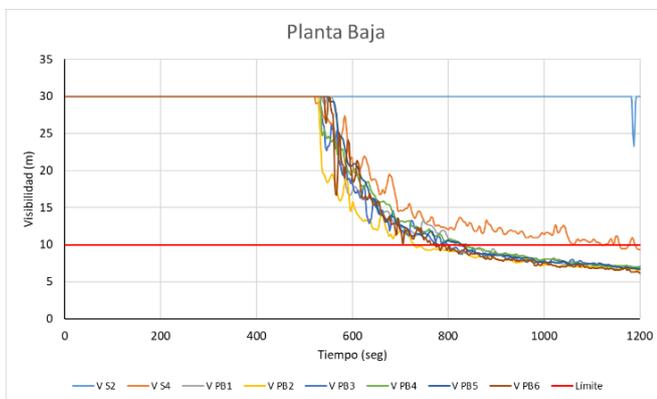


FIGURA 74 - VISIBILIDAD EN PLANTA BAJA. ALTERN. A, CASO 1.

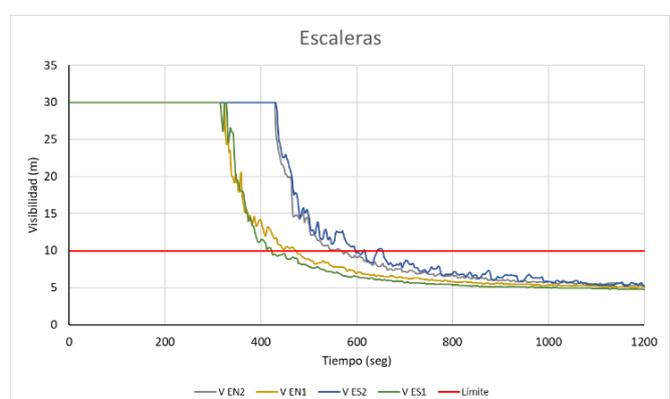


FIGURA 75 - VISIBILIDAD EN ESCALERAS. ALTERN. A, CASO 1.

En lo que respecta a los resultados de las simulaciones de evacuación, los tiempos de evacuación también son mayores (figura 76) que, en la solución prescriptiva, debido a que en esta solución no se cuenta con las escaleras interiores, y solo hay dos salidas en el edificio, en el vestíbulo, y en la fachada oeste. Además, la salida del vestíbulo se vuelve inaccesible ya que el incendio impide el acceso, con lo que la única salida posible es la oeste. Hay un aumento en el tiempo de evacuación de casi medio minuto respecto a la solución prescriptiva.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

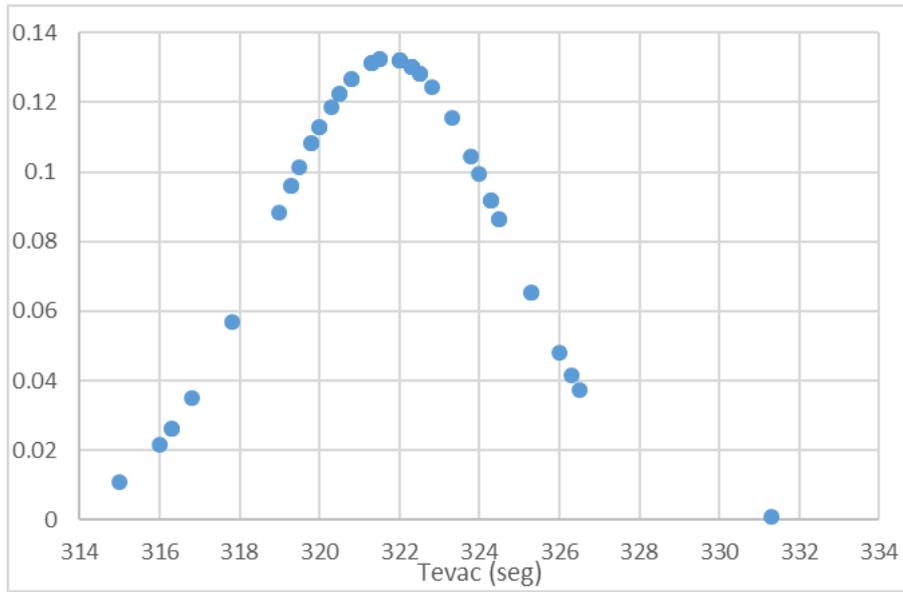


FIGURA 76 - TIEMPOS DE EVACUACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA A, CASO 1.

TABLA 16 - TIEMPOS DE EVAC., RSET MÍN. Y RSET MÁX. DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA A, CASO 1

|                  | Promedio | Percentil 95 | Desviación |
|------------------|----------|--------------|------------|
| <b>Tevac</b>     | 321.71   | 326.17       | 3.01       |
| <b>tRSET min</b> | 441.71   | 446.18       |            |
| <b>tRSET max</b> | 621.71   | 626.18       |            |

A continuación, se muestran los tiempos de evacuación planta por planta en las figuras 77 a 81. Hay que destacar en la figura 79, el escalón que se produce al final de la evacuación, debido a la única salida de planta disponible, y a la llegada de los ocupantes de las plantas superiores del edificio.

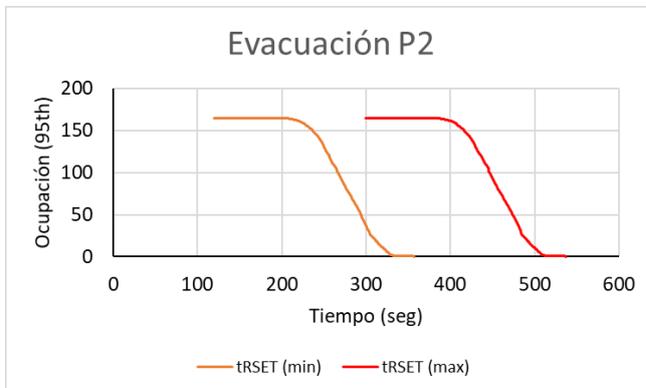


FIGURA 77 - EVAC PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 1.

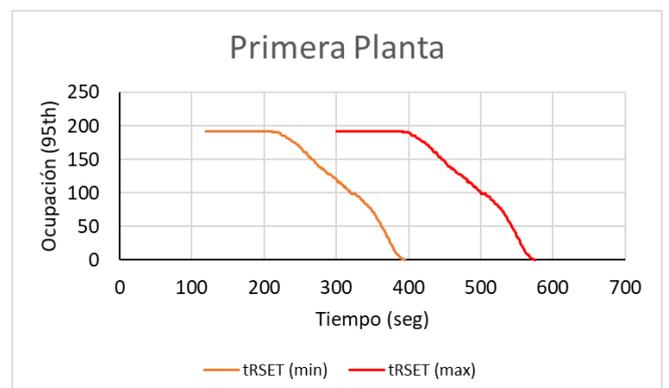
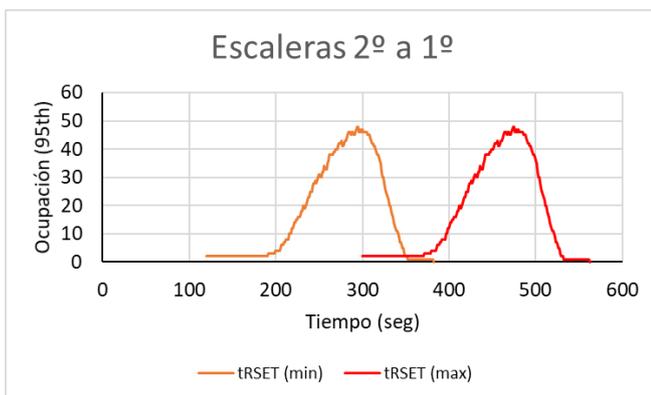


FIGURA 78 - EVAC PLANTA 1. ALTERNATIVA A, CASO 1.

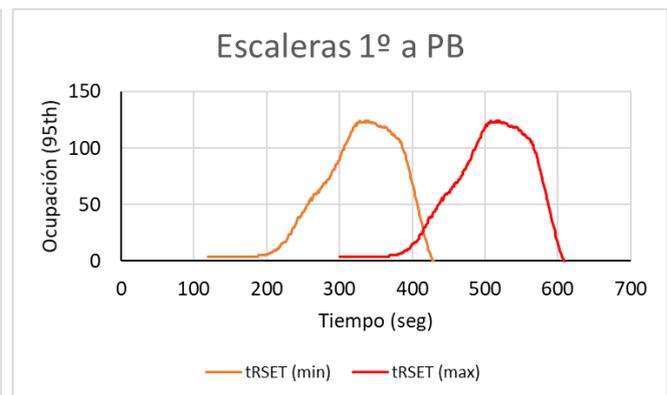
APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.



**FIGURA 80 - EVACUACIÓN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1.**



**FIGURA 79 - EVAC. DEL 2º AL 1º. ALTERN. A, CASO 1.**



**FIGURA 81 - EVAC. DEL 1º A PLANTA BAJA. ALTERN. A, CASO 1.**

Las escaleras laterales son la única vía de descenso aquí, y su ocupación es mucho mayor que en el caso prescriptivo. A continuación, se van a comparar los tiempos de evacuación con los valores de visibilidad, planta por planta, para comprobar si la evacuación se puede producir en condiciones seguras. Cada planta debe estar completamente abandonada cuando la visibilidad caiga por debajo de los 10 metros.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

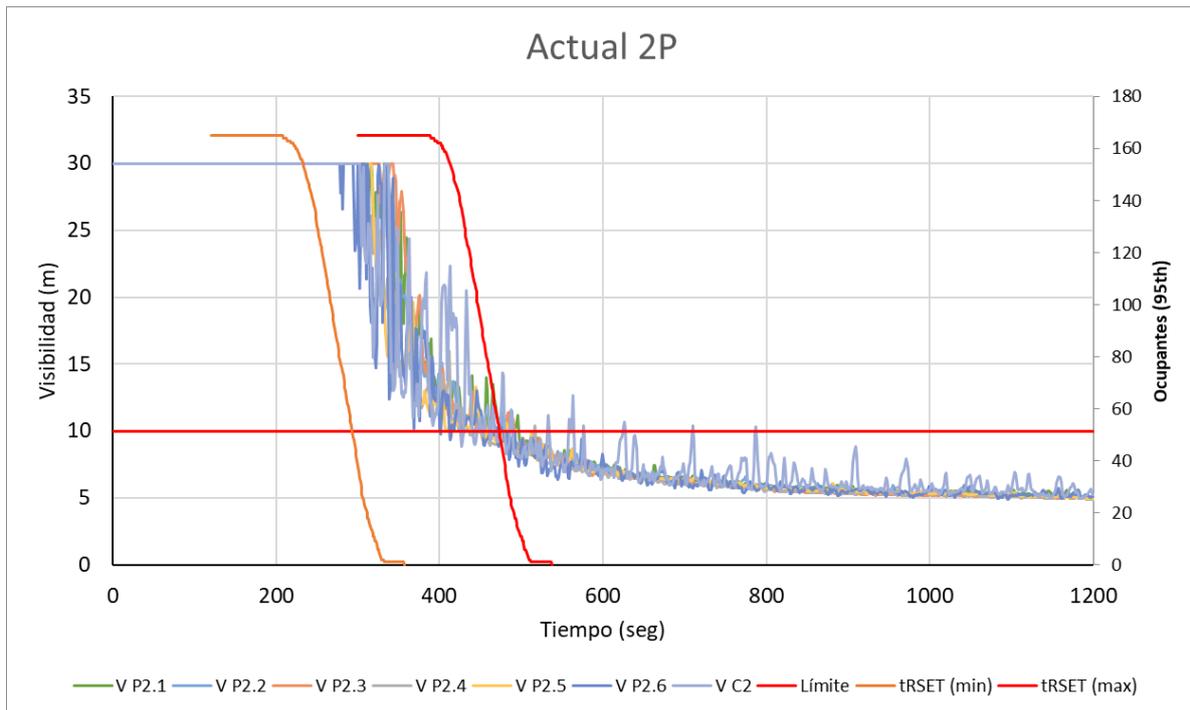


FIGURA 82 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN LA SEGUNDA PLANTA. ALTERNATIVA A, CASO 1.

Los niveles de visibilidad caen bastante por debajo del límite de 10 metros en todos los puntos de medida del pasillo del segundo piso (figura 82). El criterio de prestaciones no se cumple. Si se considera el tiempo más favorable de evacuación de los ocupantes, la evacuación puede llevarse a cabo antes de que este límite de visibilidad se sobrepase, justo antes de los 400 segundos, pero en el resto del intervalo esto no es así, y no se garantiza la seguridad de las personas.

En lo que respecta a los niveles de visibilidad en el primer piso (figura 83), de nuevo se sobrepasan los límites del criterio de prestaciones en toda la planta. Incluso en el mejor de los tiempos de evacuación, ya se empiezan a sobrepasar los límites en el punto C1, aunque se pueda considerar descartar este punto de nuevo debido a que está justo encima del ascenso del penacho de humo, el resto de los puntos del pasillo sobrepasan el límite hacia los 500 segundos, un tiempo menor que los casos de evacuación más desfavorables con lo que no se garantiza la seguridad.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

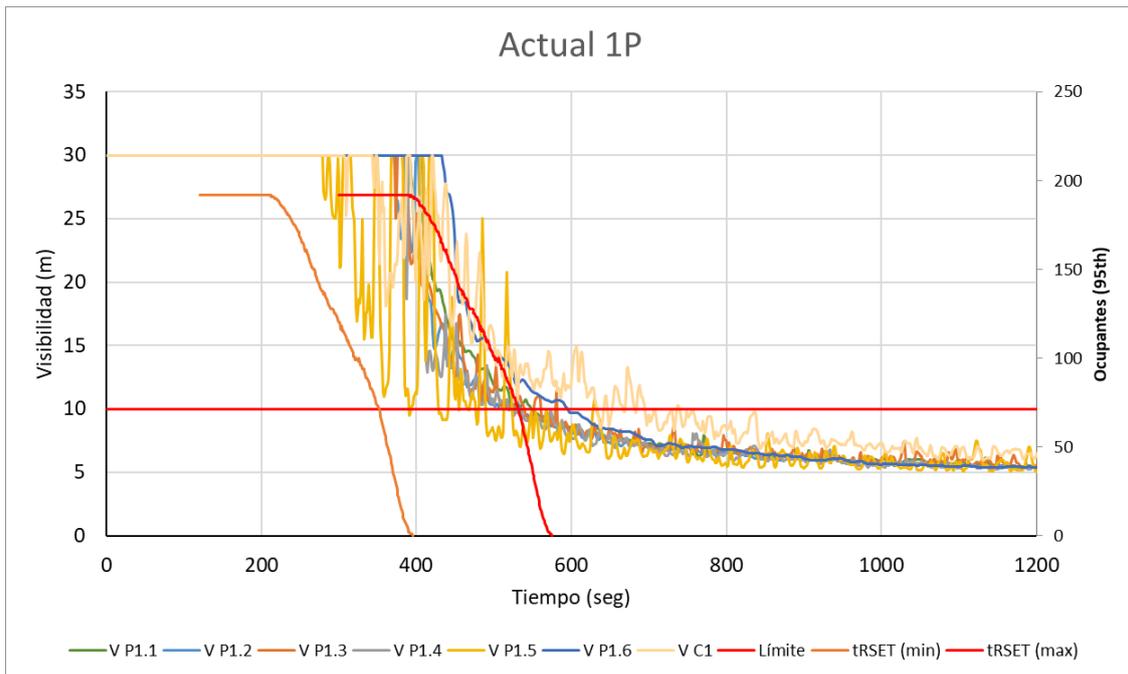


FIGURA 83 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN LA PRIMERA PLANTA. ALTERNATIVA A, CASO 1.

En la planta baja (figura 84), sin embargo, aunque la visibilidad cae por debajo del límite de 10 metros esto se produce hacia los 800 segundos, instante para el que todos los ocupantes han conseguido evacuar con bastante margen, incluso considerando los tiempos de evacuación más desfavorables.

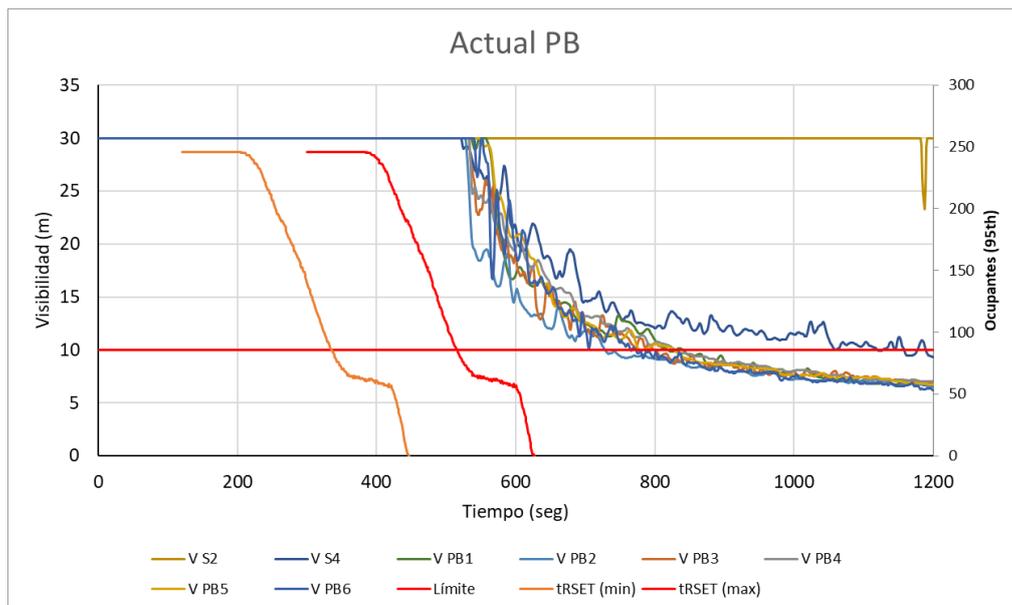


FIGURA 84 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN LA PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

La Figura 85 muestra el nivel de visibilidad en el tramo de escaleras del segundo al primer piso y su comparación con los tiempos de evacuación. En este primer tramo de escaleras la visibilidad cae por debajo del límite. Para el tiempo de evacuación más favorable, la gente puede evacuar de forma segura, pero para tiempos más desfavorable, no se garantiza su seguridad.

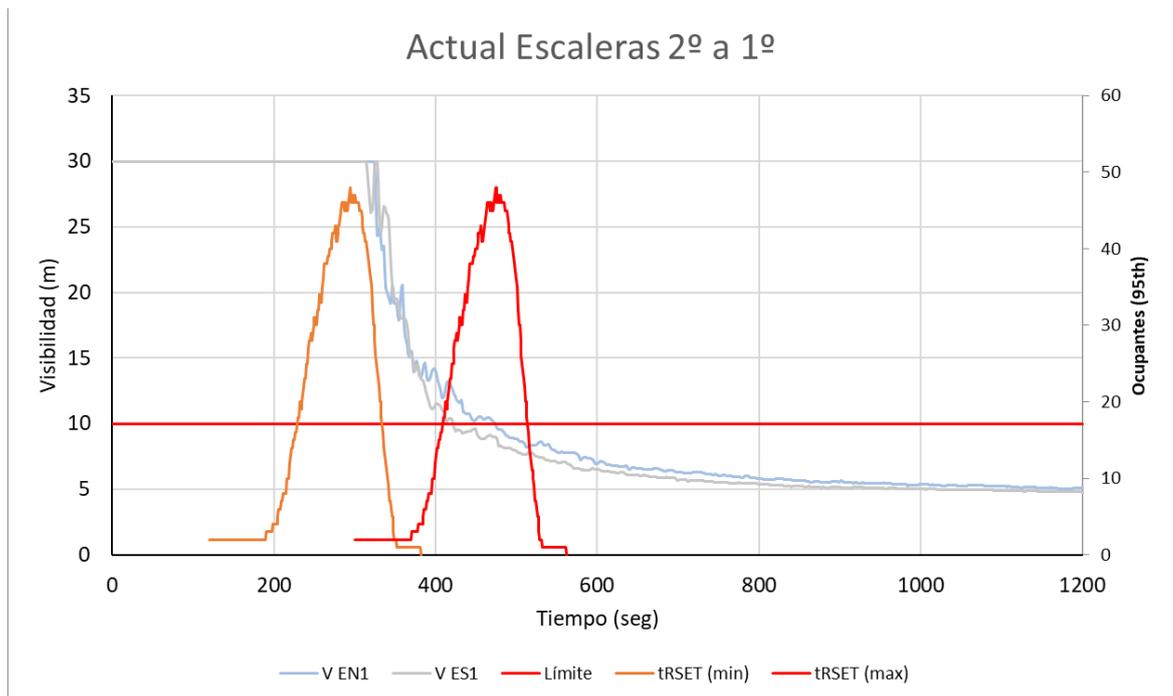


FIGURA 85 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN ESCALERAS DEL 2º AL 1º. ALTERNATIVA A, CASO 1.

En el tramo de escaleras del primer piso a la planta baja (figura 86) ocurre lo mismo que en el tramo anterior de escaleras. El límite de visibilidad se sobre pasa hacia los 550 segundos más o menos, y los tiempos de evacuación rondan entre los 400 y 600 segundos. Aunque se puede cumplir la seguridad en gran parte del intervalo, en los casos más desfavorables no es así.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

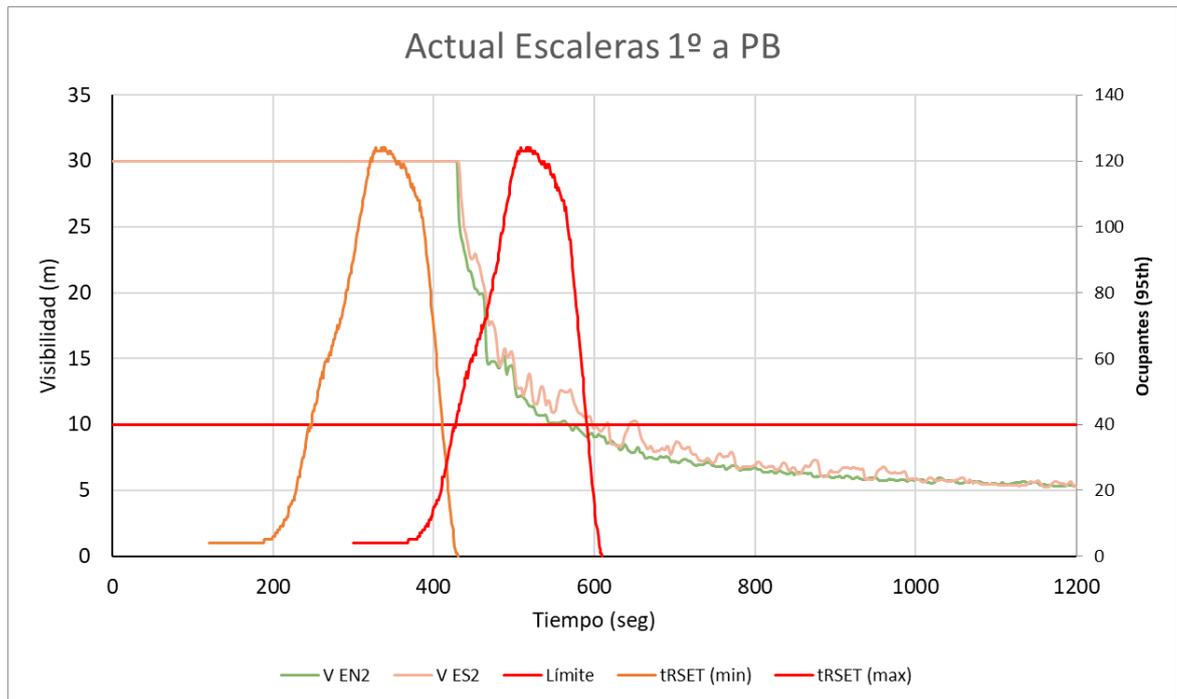


FIGURA 86 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN ESCALERAS DEL 1º A LA PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1.

De nuevo el criterio de prestaciones más restrictivo de todos es la visibilidad, cuyo límite se ve sobrepasado en las plantas primera y segunda y en los tramos de escaleras. Aunque esta solución puede dar un nivel de seguridad aceptable en los casos más favorables de evacuación, ya que los ocupantes pueden abandonar las sucesivas plantas antes de que la visibilidad caiga por debajo del límite, no se garantiza su seguridad en los casos más desfavorables, y las prestaciones son inferiores a las del caso prescriptivo.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

11.2.1.2. Prestaciones con las mejoras de la solución alternativa B

A continuación, se va a analizar la solución alternativa B propuesta. De nuevo se mostrarán solamente los resultados de la visibilidad, y el resto de los parámetros se encuentran en el Anexo B.

La Figura 87 muestra la evolución del humo en el conjunto del edificio.

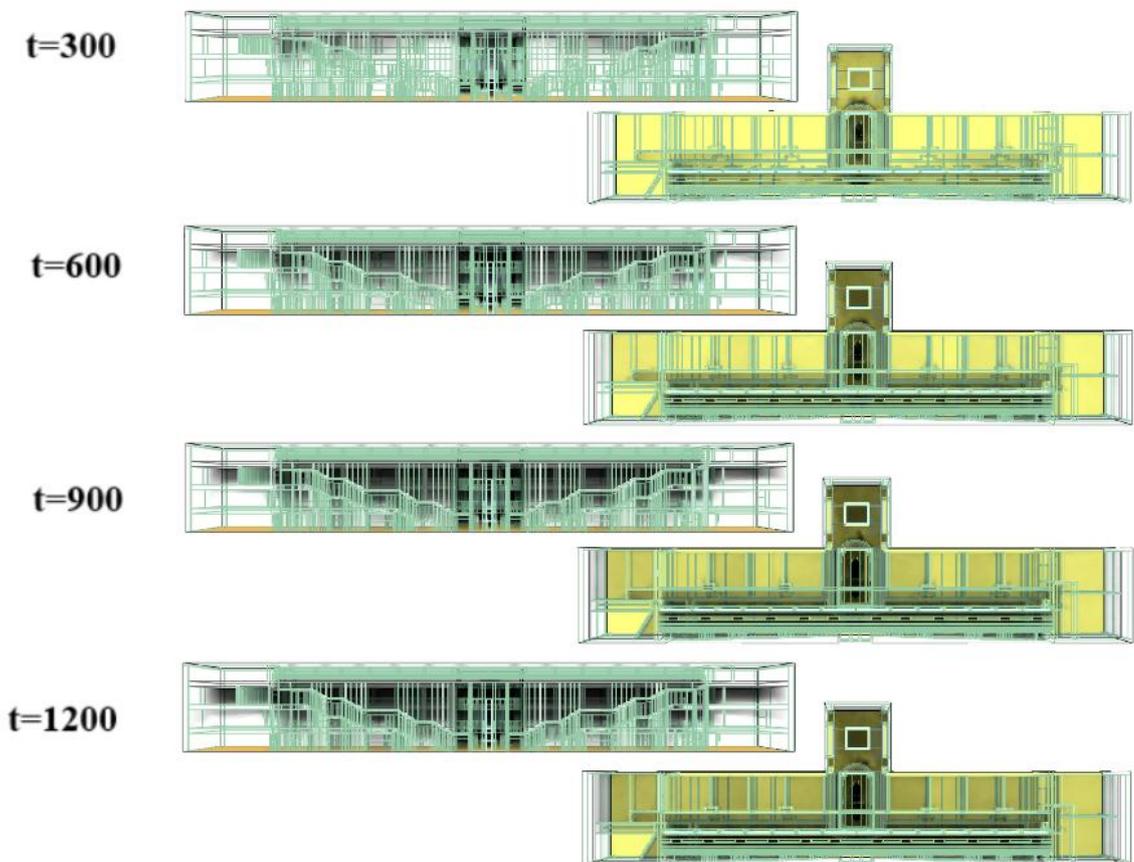


FIGURA 87 - EVOLUCIÓN DEL HUMO EN EL EDIFICIO. ALTERNATIVA B, CASO 1.

En esta solución, aunque la visibilidad se ve afectada por la acumulación de humo, el sistema de extracción mediante exutorios consigue mantener unos niveles aceptables en todo momento. En este caso, comparando con la solución prescriptiva, ni siquiera cae por debajo del límite de 10 metros en las zonas altas del edificio. A continuación, se muestran los resultados de los slices en  $x=1.25$ ,  $4.25$ ,  $8$  y  $10$  m, en las figuras 88 a 91

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

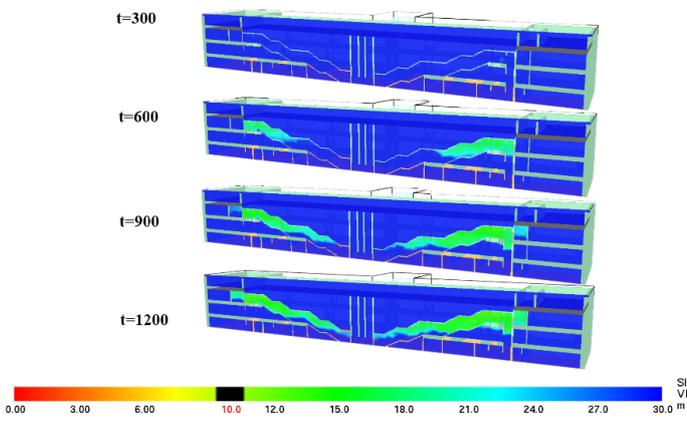


FIGURA 88 - VISIBILIDAD EN SLICE X=1.25. ALTERN. B, CASO 1.

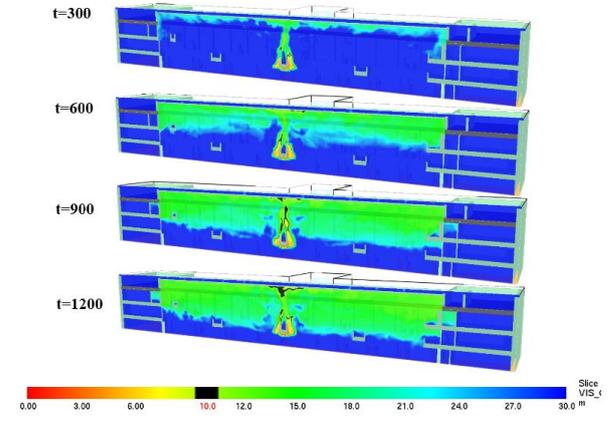


FIGURA 89 - VISIBILIDAD EN SLICE X=4.25. ALTERN. B, CASO 1.

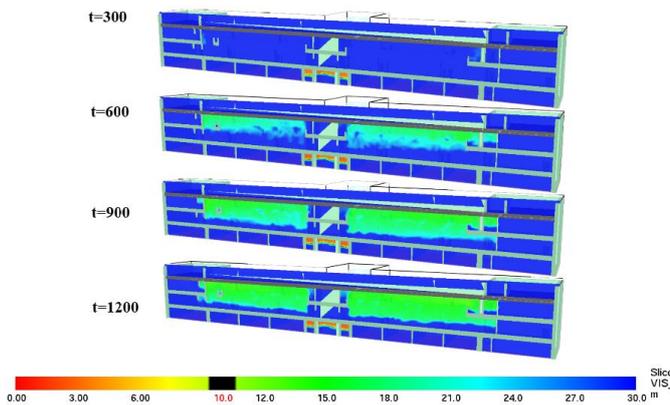


FIGURA 90 - VISIBILIDAD EN SLICE X=8. ALTERN. B, CASO 1.

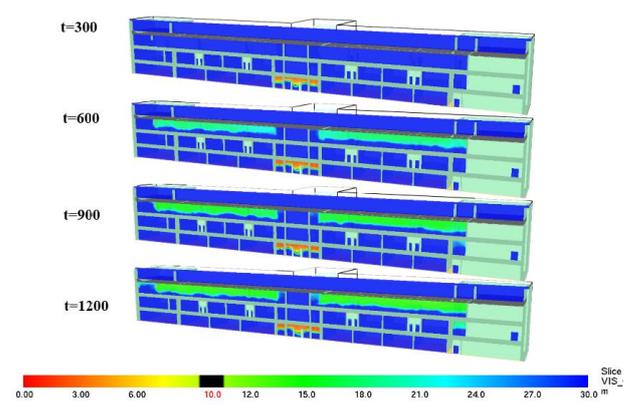


FIGURA 91 - VISIBILIDAD EN SLICE X=10. ALTERN. B, CASO 1.

Los niveles de visibilidad se mantienen en todo momento por encima del límite de forma estable. Incluso se consigue un margen mayor que en la solución prescriptiva como se ve en las figuras 92 a 94. Sólo se ven afectadas la segunda planta, el tramo de escaleras entre la segunda y la primera planta, y la primera planta, y en el resto de las escaleras y en la planta baja la visibilidad ni si quiera llega a descender.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

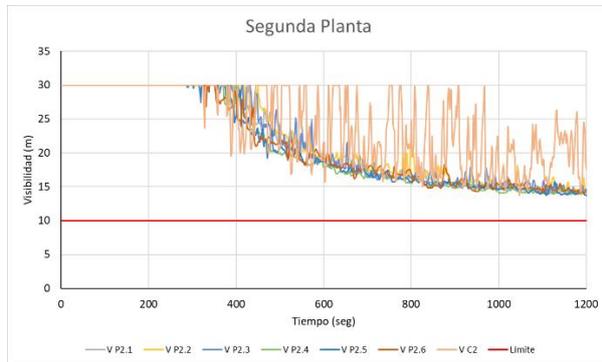


FIGURA 92– VISIBILIDAD EN LA PLANTA 2. ALTERN. B CASO 1.

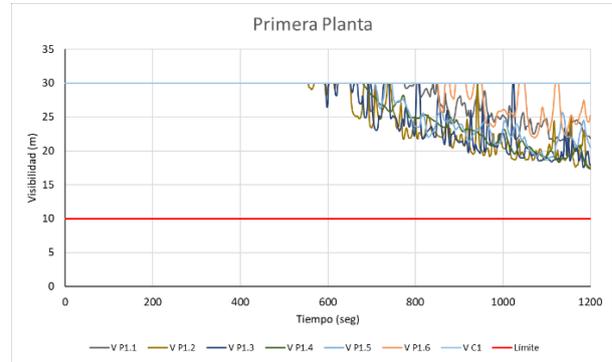


FIGURA 93 – VISIBILIDAD EN LA PLANTA 1. ALTERN. B CASO 1.

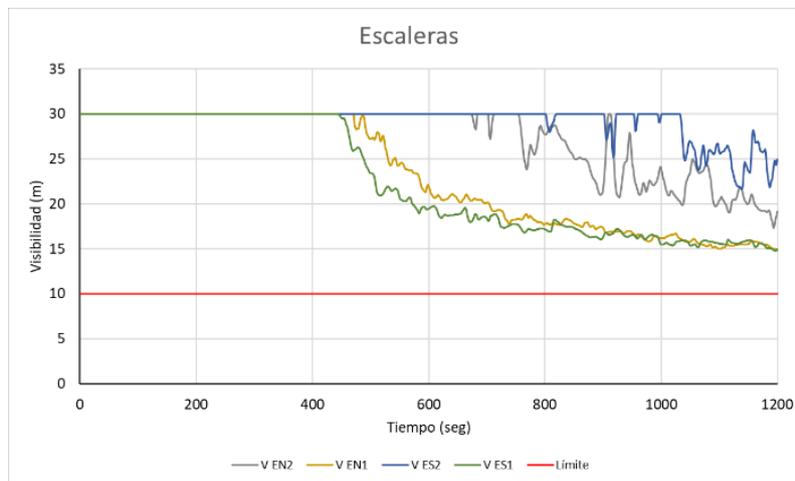


FIGURA 94 – VISIBILIDAD EN LAS ESCALERAS. ALTERNATIVA B, CASO 1.

En lo que respecta a los resultados de las simulaciones de evacuación, a pesar de haber eliminado las escaleras interiores de los sectores 1 y 3 de la solución prescriptiva, el haber mantenido las dos salidas extra en la fachada oeste ha ayudado a los tiempos de evacuación, de forma que están en torno a los 600 segundos, reduciéndose en medio minuto (figura 95). Se consigue evitar por tanto el atasco que se producía en la única salida disponible, la salida oeste, al producirse el bloqueo de la zona del vestíbulo por el incendio.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

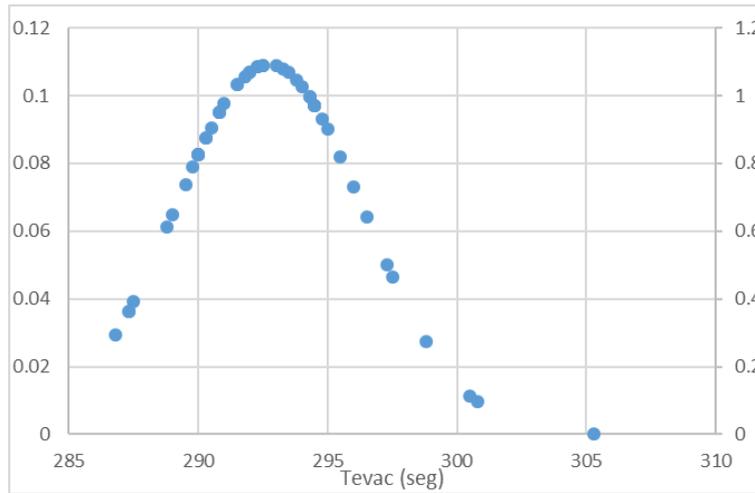


FIGURA 95 – TIEMPOS DE EVACUACIÓN EN LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA B, CASO 1.

TABLA 17 – TIEMPOS DE EVAC., RSET MÍN. Y RSET MÁX. DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA B, CASO 1.

|                  | Promedio | Percentil 95 | Desviación |
|------------------|----------|--------------|------------|
| <b>Tevac</b>     | 299.29   | 308.63       | 5.25       |
| <b>tRSET min</b> | 419.29   | 428.63       |            |
| <b>tRSET max</b> | 599.29   | 608.63       |            |

Las Figuras 96 a 100 muestran los ocupantes por planta durante la evacuación.

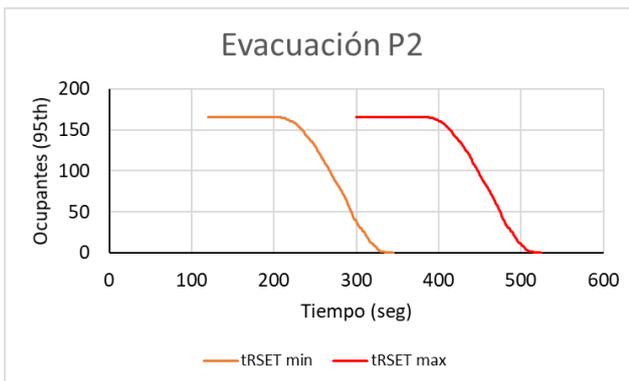


FIGURA 96 - EVAC. PLANTA 2. ALTERNATIVA B, CASO 1

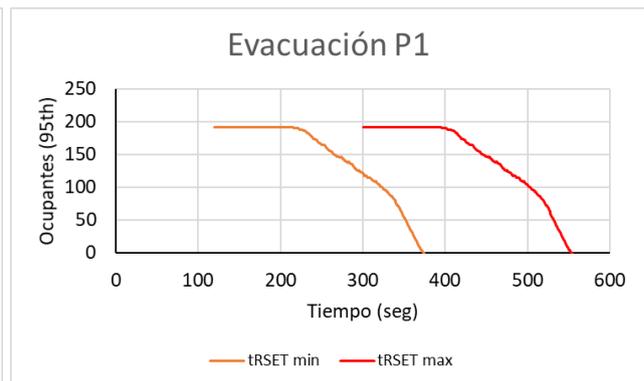


FIGURA 97 - EVAC. PLANTA 1. ALTERNATIVA B, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

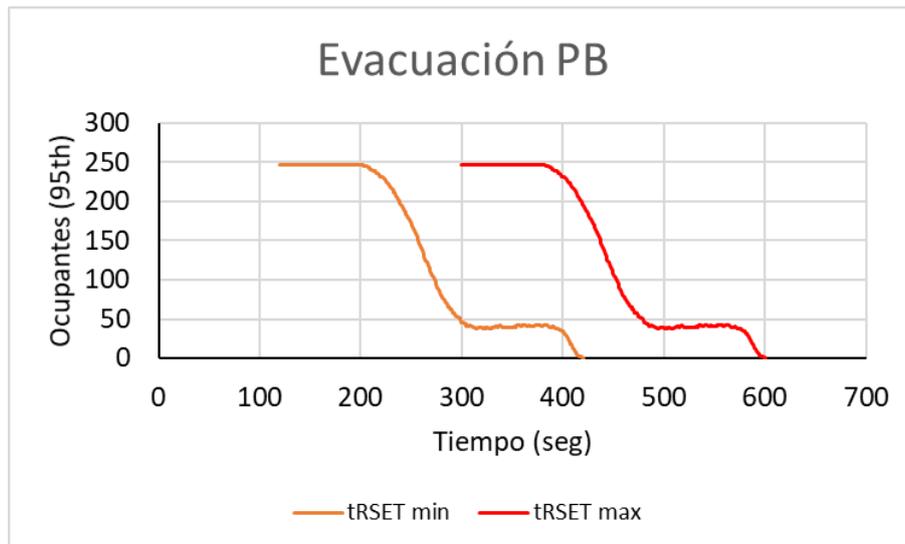


FIGURA 98 - EVACUACIÓN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 1.

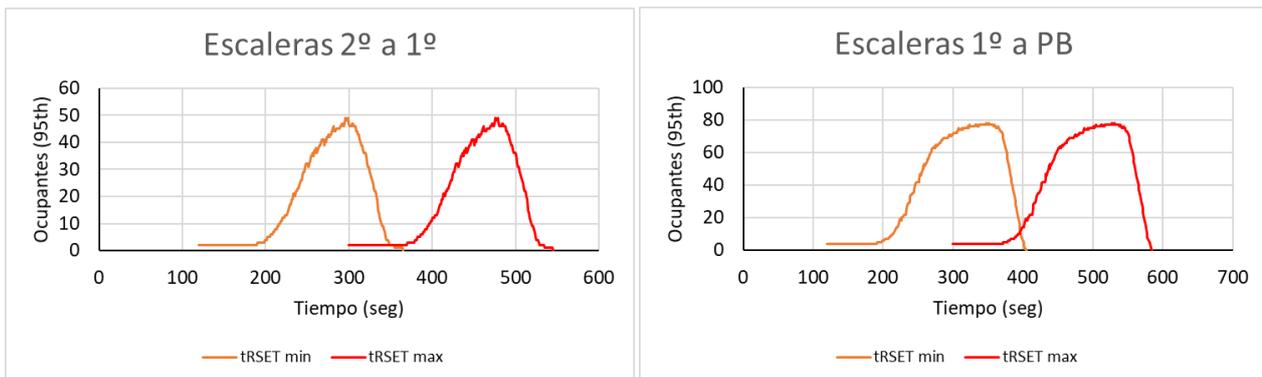


FIGURA 99 - EVAC. 2º A 1º. ALTERNATIVA B, CASO 1. FIGURA 100 – EVAC. 1º A PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 1.

A continuación, se comparan estos tiempos con los valores de visibilidad por planta. Se verá como la visibilidad se encuentra por encima del límite de los 10 metros establecidos en todo momento y en todas las plantas. Incluso los niveles obtenidos son mejores que con la solución prescriptiva según el CTE, estando la seguridad de los ocupantes garantizada en todo momento. La Figura 101 muestra la comparación para la segunda planta.



APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

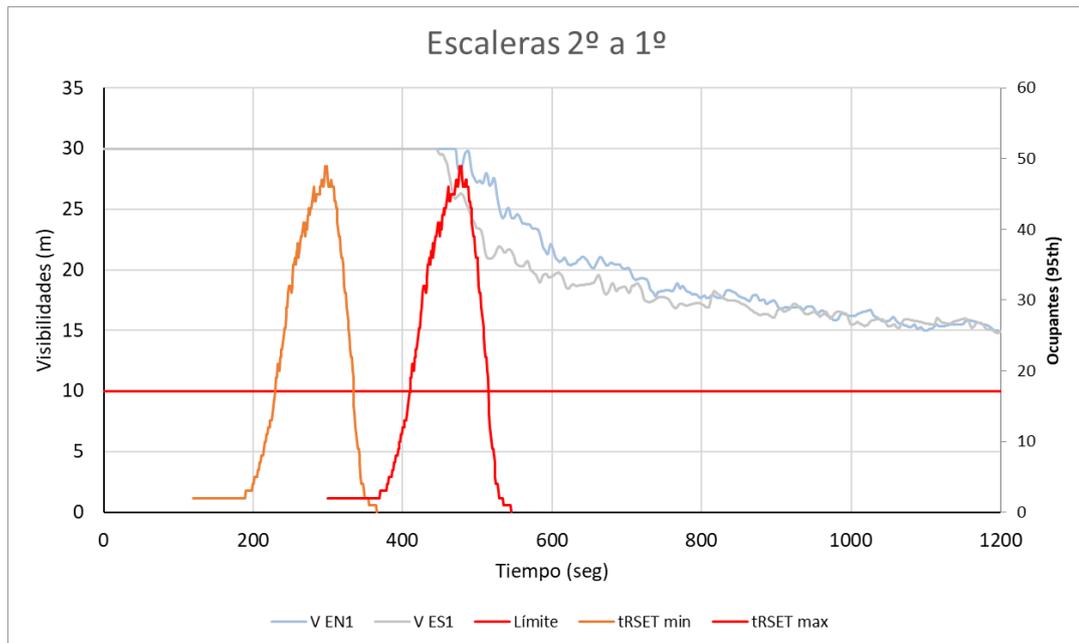


FIGURA 103 - COMPARATIVA EVAC. FRENTE A VISIBILIDAD EN ESCALERAS DEL 2º AL 1º. ALTERNATIVA B, CASO 1

En los tramos más elevados de las escaleras ya no se superan los límites de visibilidad, y se consigue un margen de seguridad mayor que en la solución prescriptiva.

En resumen, la solución alternativa B cumple con todos los niveles de seguridad, mejorando los problemas de la solución alternativa A, e incluso superando las prestaciones de la solución prescriptiva. En cuanto a tiempos de evacuación, también se consiguen unos niveles similares a la solución prescriptiva, sin añadir las dos escaleras interiores que supondrían una costosa elaboración.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

### 11.2.2. Escenario de Incendio 2 – Incendio en el aula 20 de la segunda planta.

Como se ha visto, la solución alternativa B cumple con los niveles de seguridad en el primer escenario, con un margen de seguridad algo mayor que el de referencia aportado por la solución prescriptiva. Y puesto que el desafío a la seguridad de los ocupantes que presenta el escenario 1 es más severo que en el escenario 2, se asume que la solución alternativa B cumple con los niveles también en este último caso. De forma que no es necesario realizar esta segunda simulación de incendio.

Sin embargo, en cuanto a los tiempos de evacuación, el segundo escenario de incendio es el más severo, y sí se va a realizar este análisis. De nuevo, primero se analiza la Solución Alternativa A del edificio, y después la Solución Alternativa B propuesta.

#### 11.2.2.1. Prestaciones de la solución Alternativa A.

Los resultados de evacuación para la solución A son los siguientes (figura 104). Los tiempos de evacuación son los mayores obtenidos de todos los casos, debido a la gran distancia que deben recorrer los ocupantes de la segunda planta para acceder a la única escalera de descenso que queda disponible. Casi medio minuto más que en la solución prescriptiva.

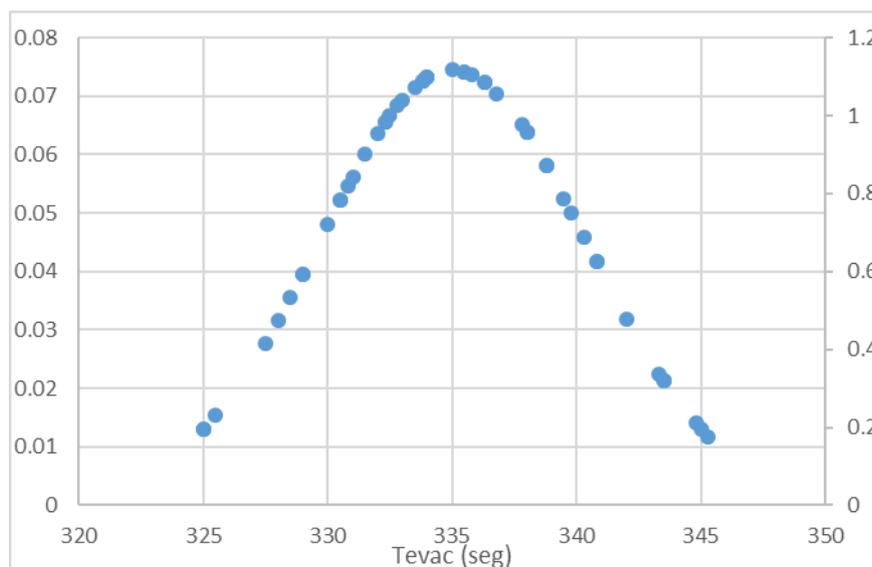


FIGURA 104 - TIEMPOS DE EVACUACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA A, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

TABLA 18 - TIEMPOS DE EVAC., RSET MÍN. Y RSET MÁX DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA A, CASO 2.

|                  | Promedio | Percentil 95 | Desviación |
|------------------|----------|--------------|------------|
| <b>Tevac</b>     | 335.02   | 344.22       | 5.35       |
| <b>tRSET min</b> | 455.02   | 464.22       |            |
| <b>tRSET max</b> | 635.02   | 644.22       |            |

La cantidad de ocupantes por planta durante la evacuación se puede ver en las figuras 105 a 109:

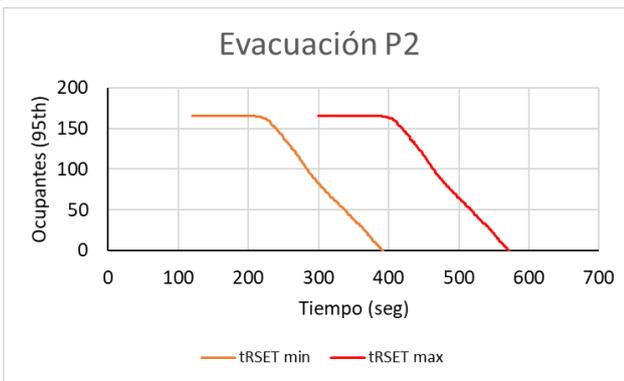


FIGURA 105 – EVAC. PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 2.

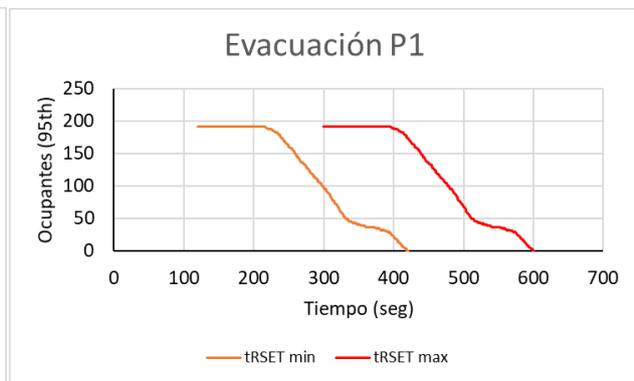


FIGURA 106 – EVAC. PLANTA 1. ALTERNATIVA A, CASO 2.

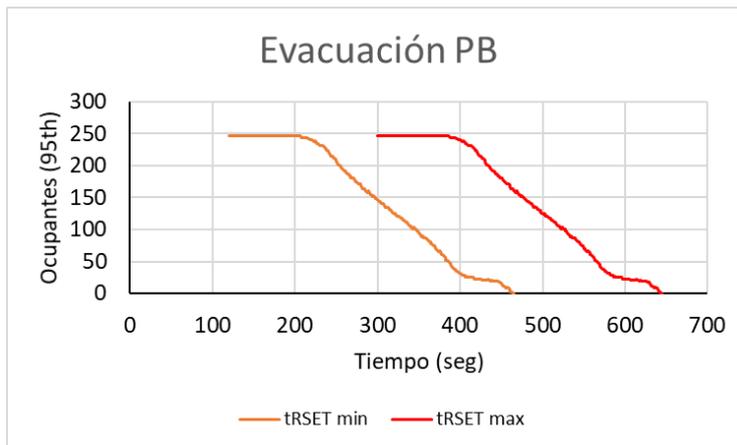


FIGURA 107 - EVACUACIÓN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

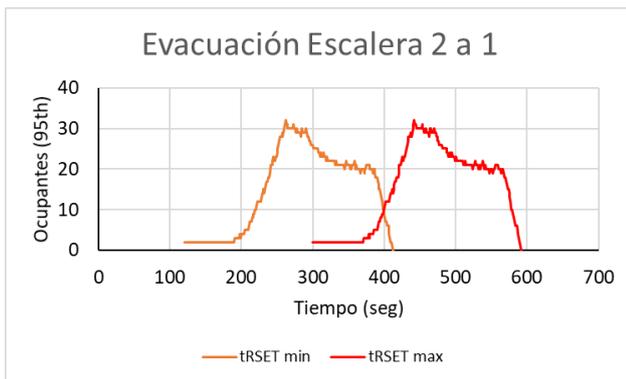


FIGURA 108 - EVAC. 2º A 1º. ALTERNATIVA A, CASO 2.

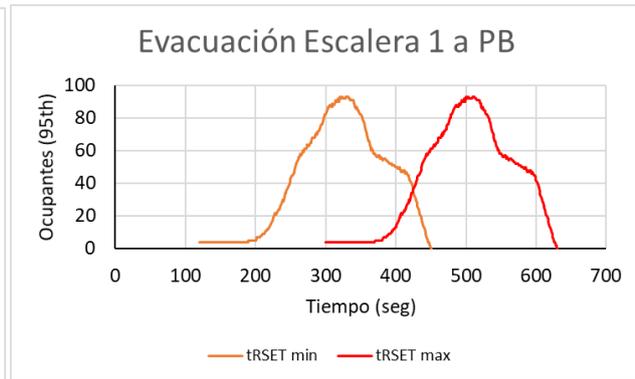


FIGURA 109 - EVAC. 1º A PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 2.

En general se aprecia como todos los tiempos son mayores que en las soluciones anteriores. Hay que destacar el efecto que se produce en las escaleras (figuras 108 y 109). Una vez pasado el pico de las curvas, que corresponde a la llegada de la gente desde los pasillos a las escaleras, la ocupación comienza a descender pero se frena, produciéndose un escalón. Esto se debe al flujo de gente que ha tenido que dar toda la vuelta al segundo piso ya que su escalera más cercana estaba bloqueada.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

11.2.2.2. Prestaciones con las mejoras de la solución alternativa B

Los resultados de las simulaciones de evacuación para la solución alternativa B muestran que los tiempos de evacuación son prácticamente idénticos a la solución prescriptiva, a pesar de prescindir de las dos escaleras interiores. Ambos casos rondan los 630 segundos totales (figura 110).

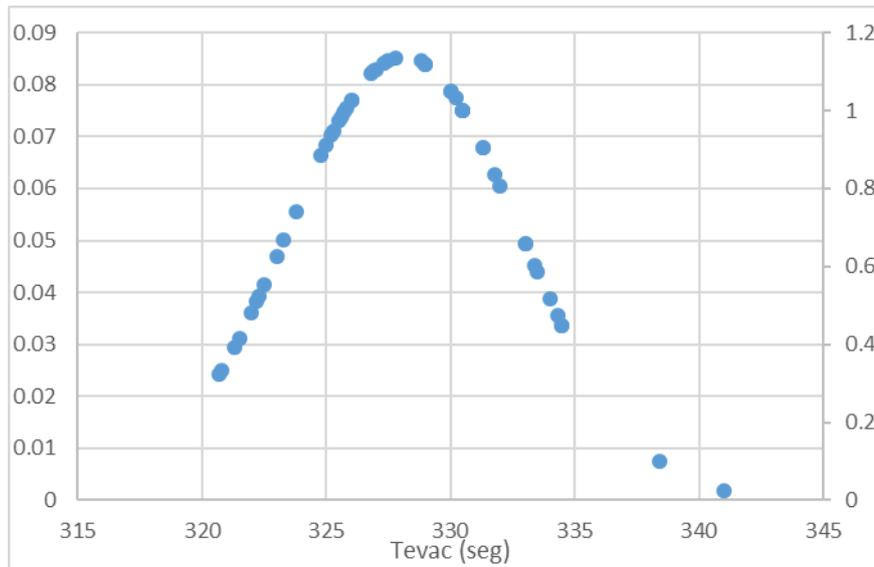


FIGURA 110 - TIEMPOS DE EVACUACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA B, CASO 2.

TABLA 19 - TIEMPOS DE EVAC., RSET MÍN. Y RSET MÁX. DE LA SOLUCIÓN ALTERNATIVA B, CASO 2.

|                  | Promedio | Percentil 95 | Desviación |
|------------------|----------|--------------|------------|
| <b>Tevac</b>     | 328.12   | 334.50       | 4.67       |
| <b>tRSET min</b> | 448.12   | 454.50       |            |
| <b>tRSET max</b> | 628.12   | 634.50       |            |

Las Figuras 111 a 115 muestran la cantidad de ocupantes por planta durante la evacuación. En este caso no se produce el efecto de estancamiento en las escaleras que se producía en la solución alternativa A. Las salidas añadidas en la fachada oeste ayudan al flujo de personas, de manera que los ocupantes no se acumulen. Aunque sí que se produce un cierto estancamiento en la planta baja, como se ve en la figura 113, la evacuación se realiza en un tiempo aceptable.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

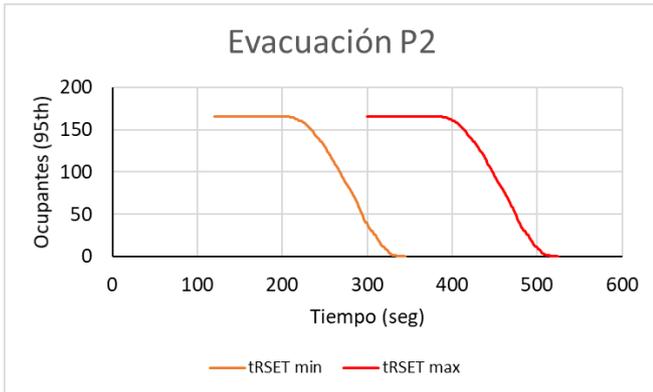


FIGURA 111 - EVAC. PLANTA 2. ALTERNATIVA B, CASO 2.

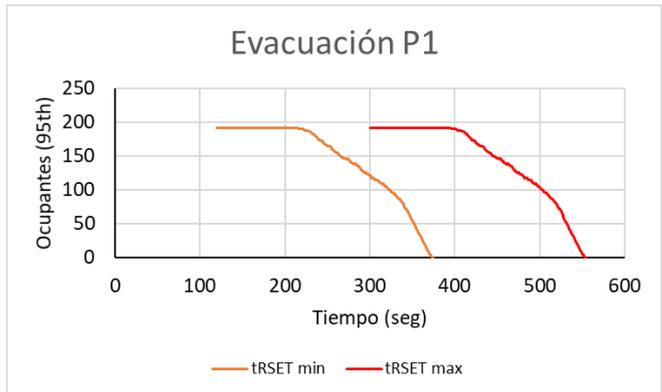


FIGURA 112 - EVAC. PLANTA 1. ALTERNATIVA B, CASO 2.

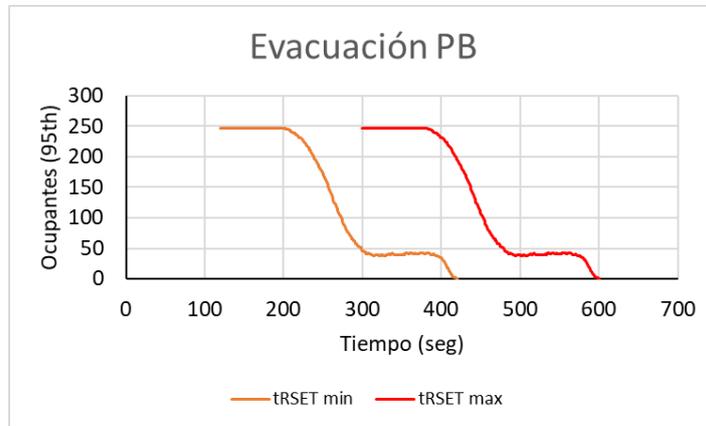


FIGURA 113 - EVACUACIÓN DE LA PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 2.

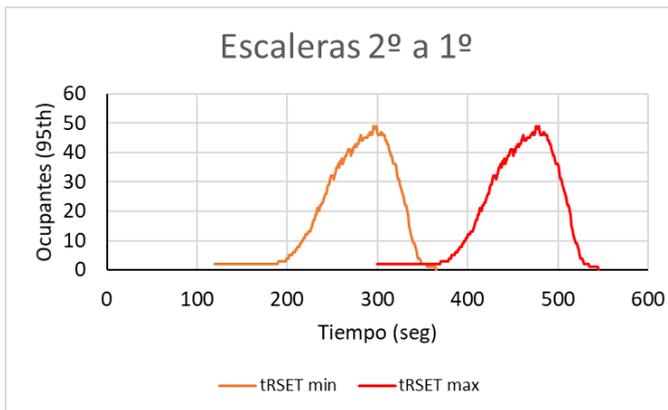


FIGURA 114 – EVAC. 2º A 1º. ALTERNATIVA B, CASO 2.

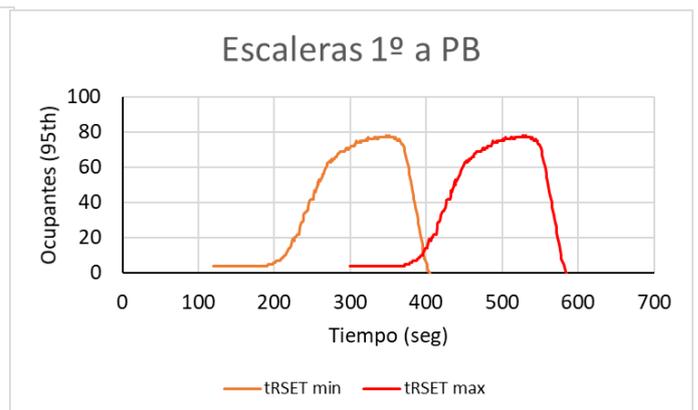


FIGURA 115 – EVAC. 1º A PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 2.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

En resumen, el bloqueo de una de las escaleras laterales tiene un impacto considerable al obligar a los ocupantes de la segunda planta, la que presenta los valores de visibilidad más bajos y en un tiempo más temprano, a recorrer todo el pasillo hasta alcanzar otra salida de planta y estar expuestos más tiempo a estas condiciones. La solución prescriptiva presenta mejores tiempos que la solución alternativa A del edificio, debido al mayor número de salidas, y a las dos escaleras adicionales que presenta en el interior de los sectores 1 y 3. En la solución alternativa B, se consiguen reducir estos tiempos a niveles parecidos, que los de la solución prescriptiva, gracias a la apertura de las salidas S1 y S3 en la planta baja. De esta forma se alivia el atasco producido en las salidas más familiares a los ocupantes, S2 y S4, sin necesidad de añadir dos grupos de escaleras nuevos como en la solución CTE, que implicarían una costosa elaboración.

## 12. CONCLUSIÓN

A la vista de los resultados obtenidos, el criterio de prestaciones clave que determina la seguridad de las personas es el nivel de visibilidad. A su vez, estos niveles son más severos en el primer escenario de incendio, en el recinto de conserjería de la planta baja, que en el segundo escenario, en el aula del segundo piso.

La solución prescriptiva según el CTE cumple este criterio de visibilidad, hasta en las plantas superiores, las más amenazadas por la acumulación de humos en el depósito de la cubierta, y garantiza un nivel de seguridad aceptable que permite la evacuación en condiciones seguras.

Aunque la solución alternativa A puede llegar a cumplir ese nivel de seguridad en las hipótesis más favorables de evacuación, esto no es así para las más desfavorables, y los niveles de visibilidad sobrepasan los límites establecidos. Por otra parte, la solución alternativa B mejora estas prestaciones de forma que se cumple el nivel de seguridad incluso mejorando el nivel aportado por la solución prescriptiva.

### 13. REFERENCIAS

- [1] Norma ISO/DIS 23932-1. “*Fire safety engineering - General Principles – Part 1: General*”. Septiembre de 2018
- [2] Real Decreto 314/2006. *Código Técnico de la Edificación*. 28 de marzo de 2006.
- [3] Real Decreto 314/2006. *Documento Básico de Seguridad en caso de incendio*. 28 de marzo de 2006.
- [4] NFPA. *Manual de protección contra incendios*. Editorial MAPFRE. 1 de octubre de 1993. ISBN 978-8471006455.
- [5] TF BARRY. *Risk-Informed, Performance-Based Industrial Fire Protection. An Alternative to Prescriptive Codes*. Tennessee Valley Pub, 10 de Mayo de 2002. ISBN 978-1-8821-9409-4.
- [6] HURLEY MJ, GOTTUK DT, HALL JR, HARADA K, KULIGOWSKI ED, PUCHOVSKY M, TORERO JL, WATTS JM, WIECZOREK CJ. *SFPE Handbook of Fire Protection*. Quinta Edición. New York, Springer-Verlag New York, 2016. ISBN 978-1-4939-2565-0
- [7] Norma Española UNE 23585. *Seguridad contra incendios. Sistemas de control de humo y calor. Requisitos y métodos de cálculo y diseño para proyectar un sistema de control de temperatura y de evacuación de humos (SCTEH) en caso de incendio estacionario*. 22 de noviembre de 2017.
- [8] Norma Española UNE-EN 12101-2. *Sistemas para el control de humos y de calor. Parte 2: Especificaciones para aireadores de extracción natural de humos y calor*. 11 de junio de 2004.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- [9] Norma UNE-EN 1991-1-4. *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*. 20 de junio de 2018.
- [10] Norma ISO/DIS 16733-1. “*Fire safety engineering – Selection of design fires scenarios and design fires – Part 1: Selection of design fire scenarios*”. Septiembre de 2015.
- [11] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). *Standard Reference Database Number 75*. Enero de 1999.
- [12] BJÖRN KARLSSON, JAMES G. QUINTIERE. *Enclosure of Fire Dynamics*. United States, CRC Press, 28 de septiembre de 1999. ISBN 0-8493-1300-7.
- [13] Norma ISO/WD 29761. “*Fire safety engineering – Selection of design occupant behavioural scenarios and design behaviours*”. Diciembre de 2015.
- [14] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). MSC.1/Circ. 1238 *Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships*. 30 de octubre de 2007.
- [15] *Mujeres y hombres en las titulaciones de la Universidad de Cantabria. Documento Anexo: Gráficos de todas las titulaciones*. Santander, 2019.
- [16] *Portal de Transparencia Universidad de Cantabria – Personal*. Universidad de Cantabria, ©2016 [Consulta: noviembre de 2019]. Disponible en: <https://web.unican.es/transparencia/personal>
- [17] Norma ISO/TR 16738. “*Fire safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people*”. Agosto de 2009.
- [18] KEVIN MCGRATTAN, SIMO HOSTIKKA, RANDALL MCDERMOTT, JASON FLOYD, MARCOS VANELLA. *Fire Dynamics Simulator User’s Guide*. Sexta edición. 4 de febrero de 2019.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

- [19] KEVIN MCGRATTAN, SIMO HOSTIKKA, JASON FLOYD, RANDALL MCDERMOTT, MARCOS VANELLA. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation*. Sexta edición. 31 de Octubre de 2019.
- [20] RICHARD D. PEACOCK, SANFORD DAVIS, BILLY T. LEE. *An experimental Data Set for the Accuracy Assessment of Room Fire Models (NBSIR 88-3752)*. 1 de Abril de 1988.
- [21] DOUGLAS DRYSDALE. *An Introduction to Fire Dynamics*. Tercera edición. Editorial Wiley, 19 de septiembre de 2011. ISBN 978-0470319031.

## ANEXO A – RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN CTE

A continuación, se incluyen el resto de los resultados obtenidos en las simulaciones, en base al resto de parámetros que han sido evaluados, pero cuyos resultados no tienen un gran impacto, bien porque apenas se ven afectados, o bien porque los valores alcanzados están lejos de los límites de sostenibilidad establecidos y no son una amenaza para los ocupantes.

### A.1. Escenario de incendio 1

PC2 Temperatura: Slices en x=1.25, 4.25, 8 y 10 metros.

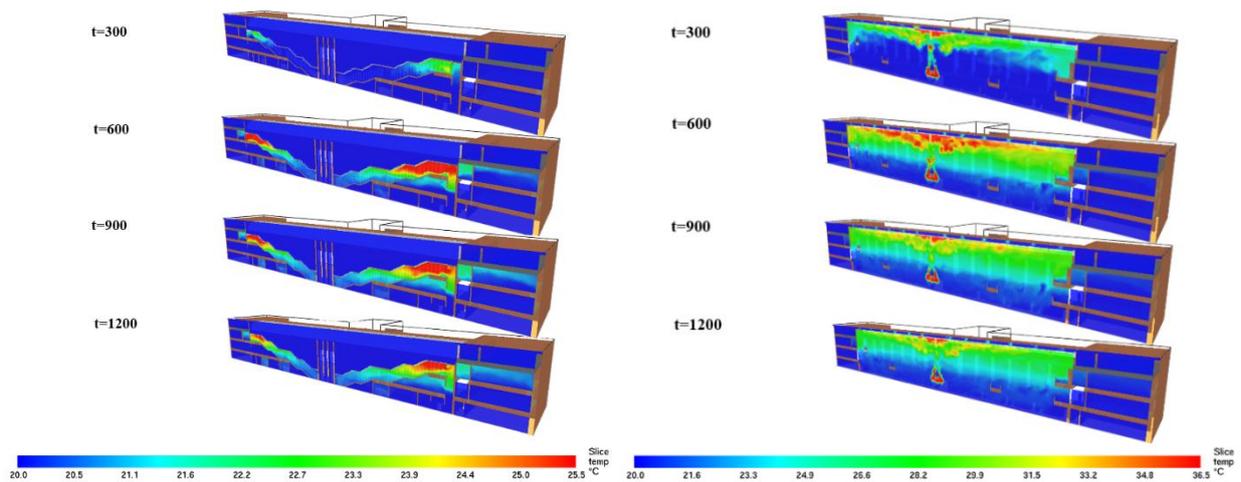


FIGURA 116 – TEMP. EN SLICE X= 1.25. CTE,CASO 1

FIGURA 117 – TEMP. EN SLICE X= 4.25. CTE,CASO 1

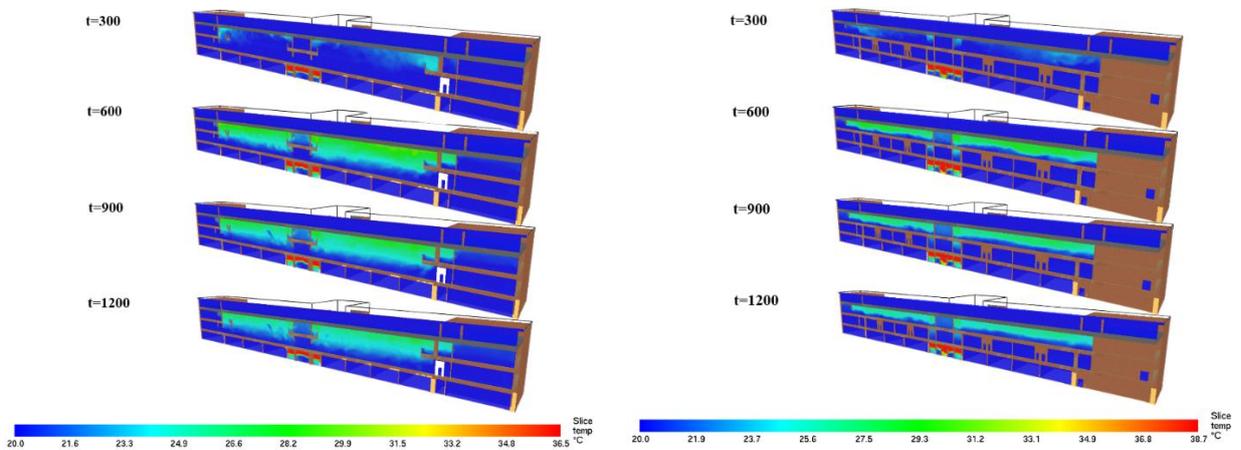


FIGURA 118 – TEMP. EN SLICE X= 8. CTE,CASO 1

FIGURA 119 – TEMP. EN SLICE X= 10. CTE,CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Gráficas de mediciones de los Devices:

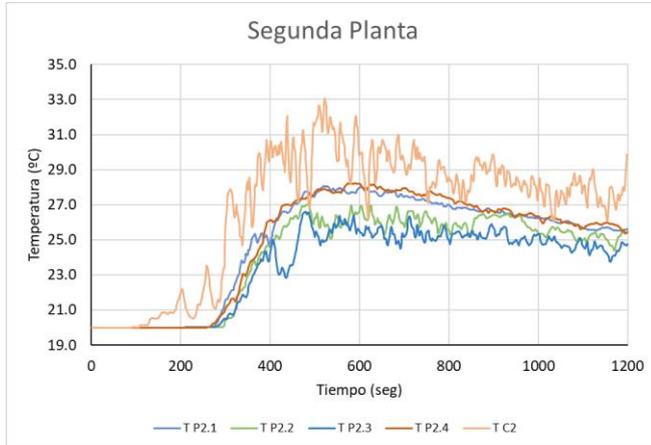


FIGURA 120 – TEMPERATURA EN PLANTA 2. CTE, CASO 1.

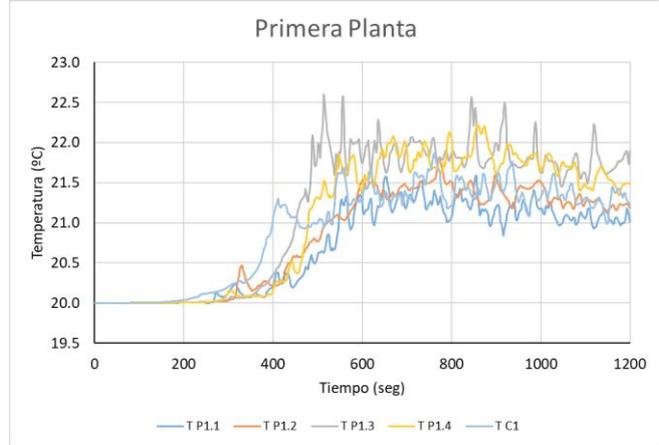


FIGURA 121 – TEMPERATURA EN PLANTA 1. CTE, CASO 1.

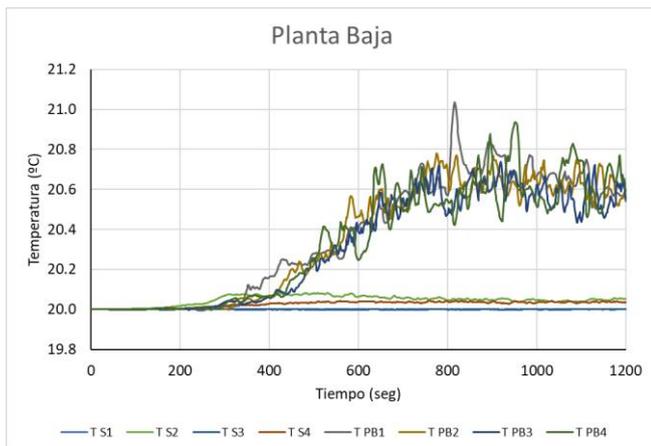


FIGURA 122 – TEMP. EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

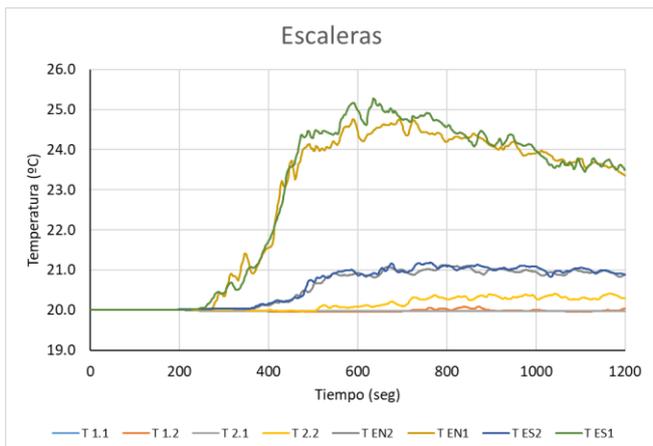


FIGURA 123 – TEMP. EN ESCALERAS. CTE, CASO 1.

PC3: Concentración de Oxígeno

Los valores se mantienen constantes y apenas hay variación respecto de las condiciones normales. No se aprecian cambios en los Slices.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Gráficas de mediciones de los Devices:

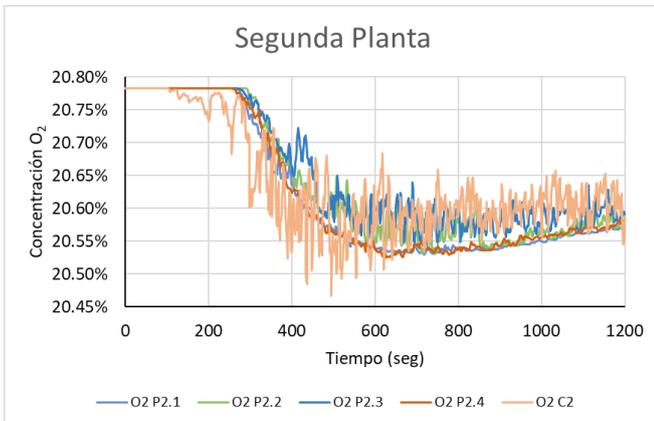


FIGURA 124 – OXÍGENO EN PLANTA 2. CTE, CASO 1.

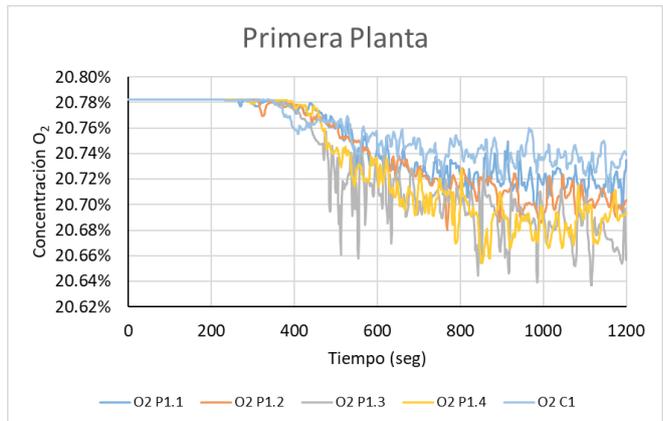


FIGURA 125 – OXÍGENO EN PLANTA 1. CTE, CASO 1.

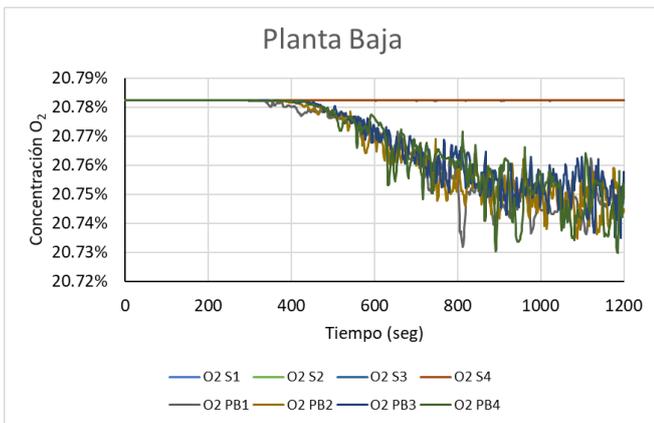


FIGURA 126 – OXÍGENO EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

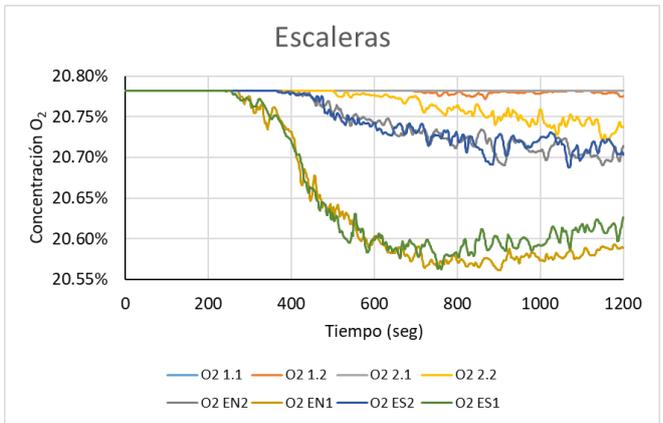


FIGURA 127 – OXÍGENO EN ESCALERAS. CTE, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC4, Concentración de Monóxido de Carbono.

En el único Slice en que se detecta alguna variación considerable es en  $x=1.25$  m:

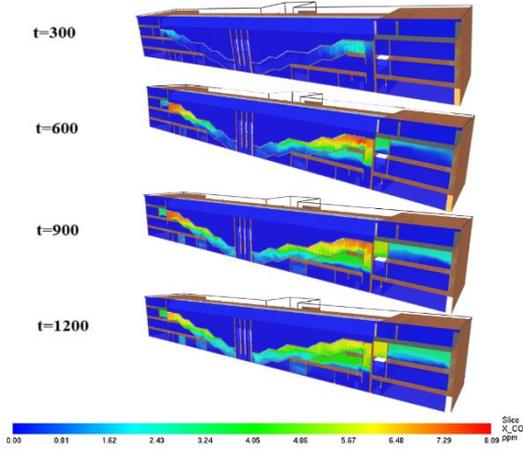


FIGURA 128 - CO. EN SLICE X= 1.25. CTE, CASO 1

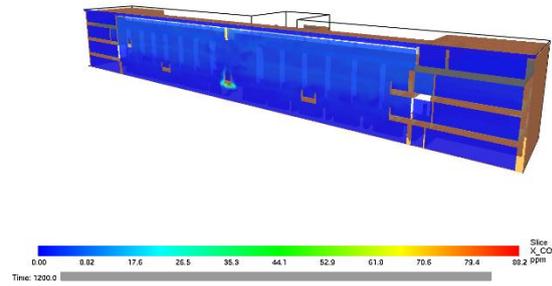


FIGURA 129 – CO FINAL EN SLICE X=4.25. CTE, CASO 1

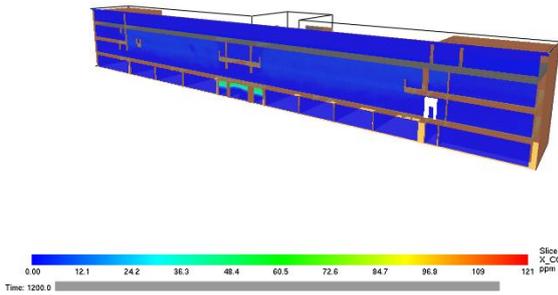


FIGURA 130 – CO FINAL EN SLICE X=8. CTE, CASO 1

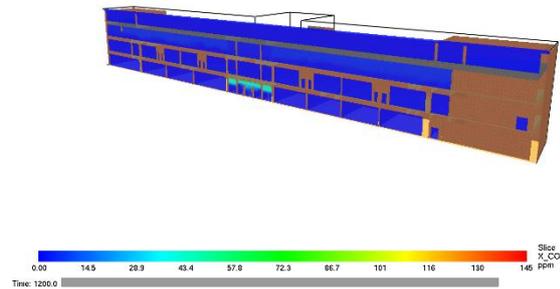


FIGURA 131 – CO FINAL EN SLICE X=10. CTE, CASO 1

Gráficas de mediciones de los Devices:

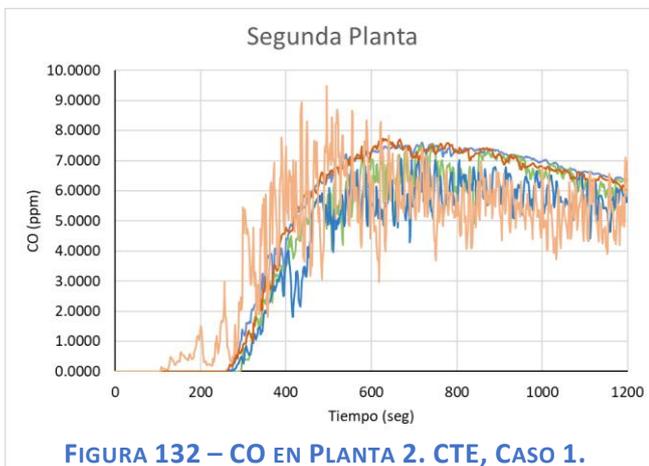


FIGURA 132 – CO EN PLANTA 2. CTE, CASO 1.

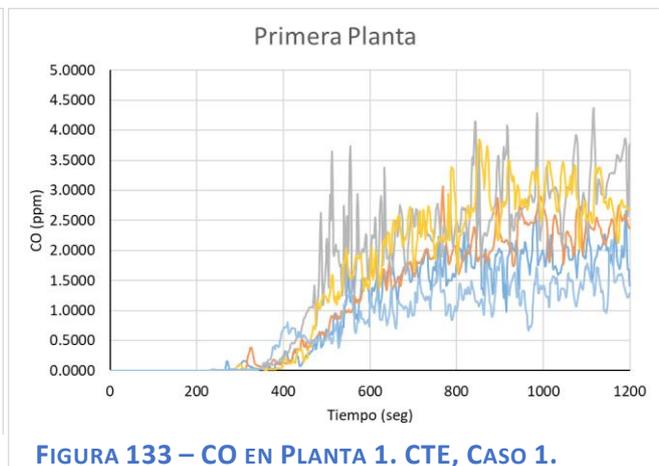


FIGURA 133 – CO EN PLANTA 1. CTE, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

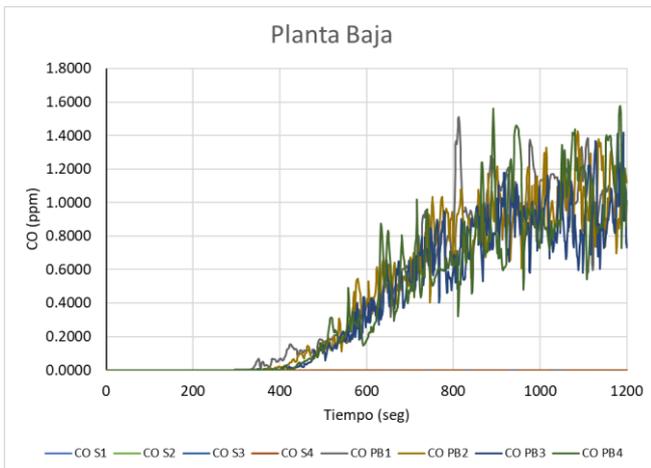


FIGURA 134 – CO EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

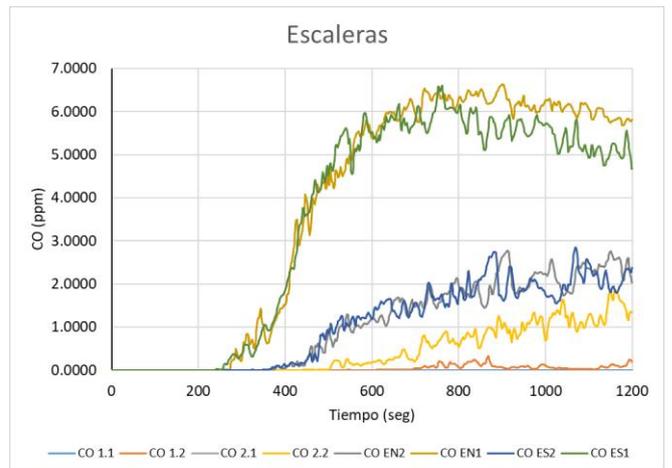


FIGURA 135 – CO EN ESCALERAS. CTE, CASO 1.

PC5, Concentración de Dióxido de Carbono: Slices en x=1.25, 4.25, 8 y 10 m:

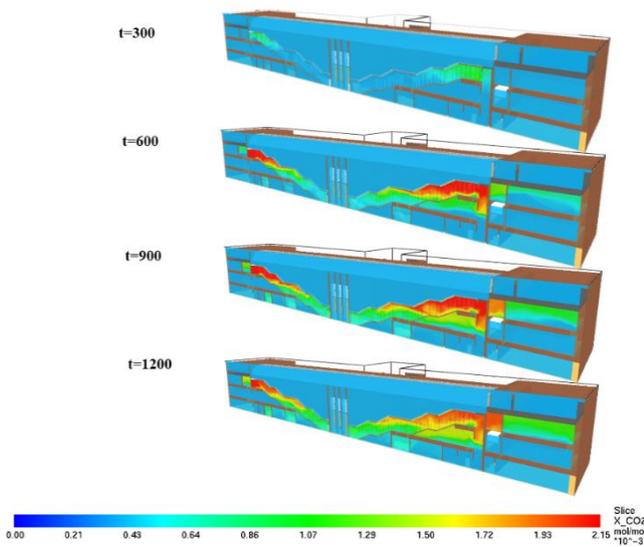


FIGURA 136 – CO2. EN SLICE X= 1.25. CTE,CASO 1

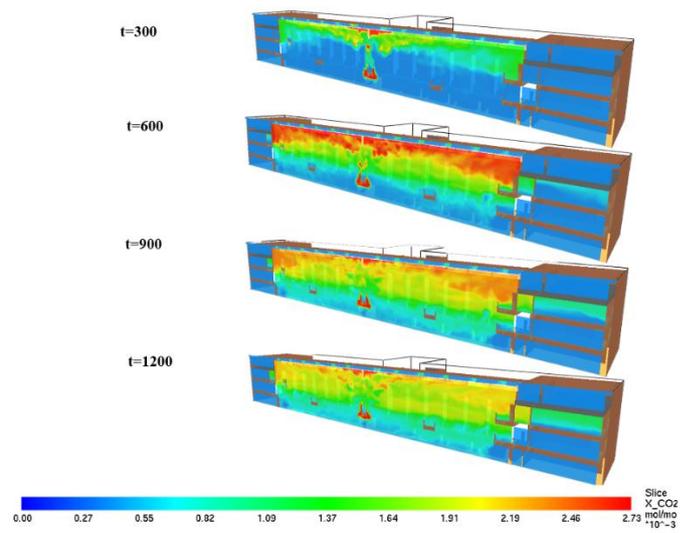


FIGURA 137 – CO2. EN SLICE X= 4.25. CTE,CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

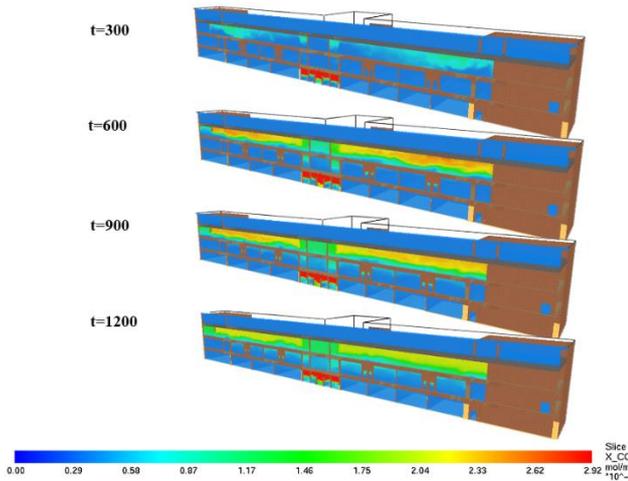


FIGURA 138 – CO2. EN SLICE X= 8. CTE,CASO 1

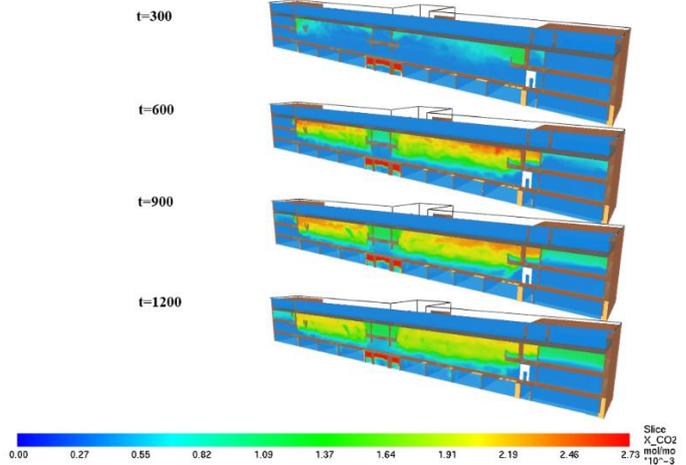


FIGURA 139 – CO2. EN SLICE X= 10. CTE,CASO 1

Gráficas de mediciones de Devices:

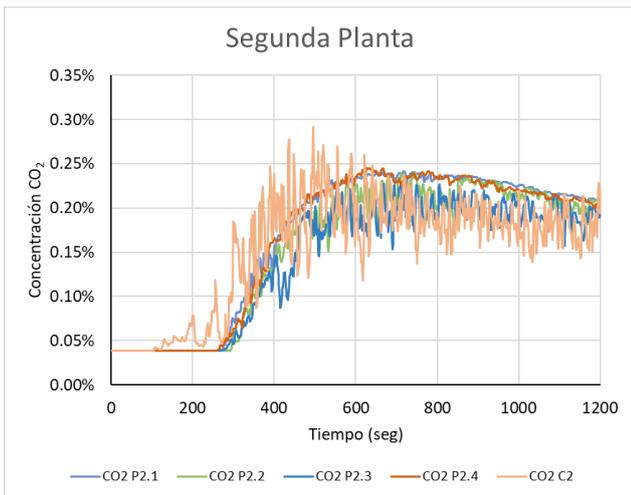


FIGURA 140 – CO2 EN PLANTA 2. CTE, CASO 1.

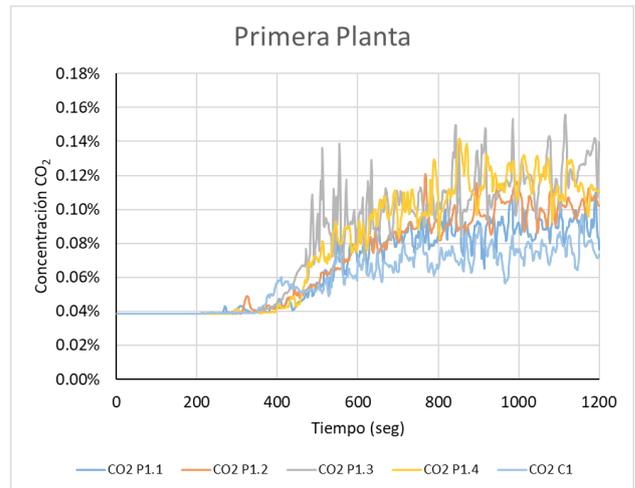


FIGURA 141 – CO2 EN PLANTA 1. CTE, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

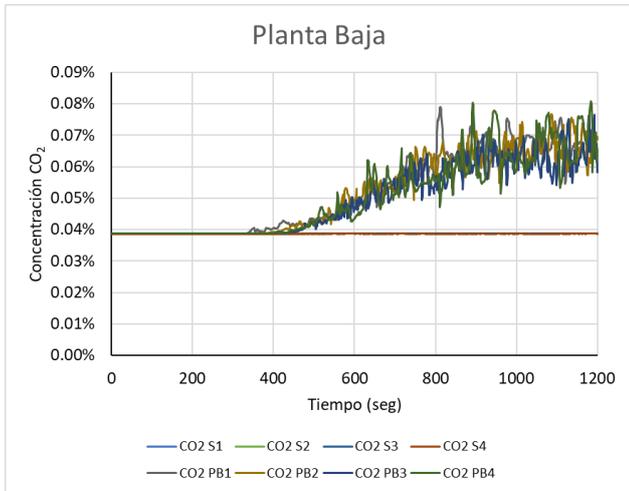


FIGURA 142 – CO<sub>2</sub> EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

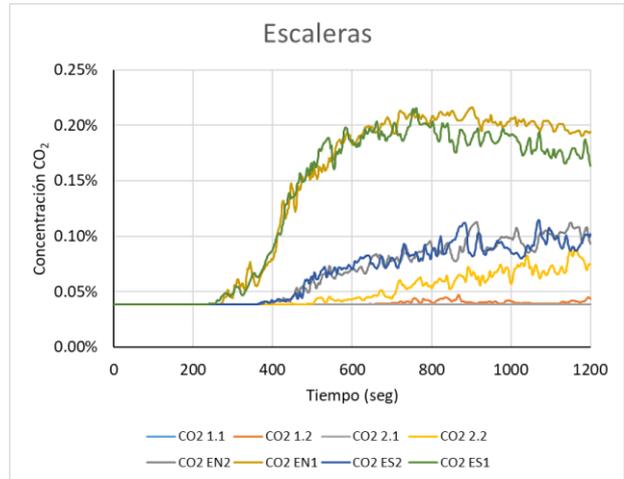


FIGURA 143 – CO<sub>2</sub> EN ESCALERAS. CTE, CASO 1.

PC6, Radiación: Resultados de mediciones de los Devices.

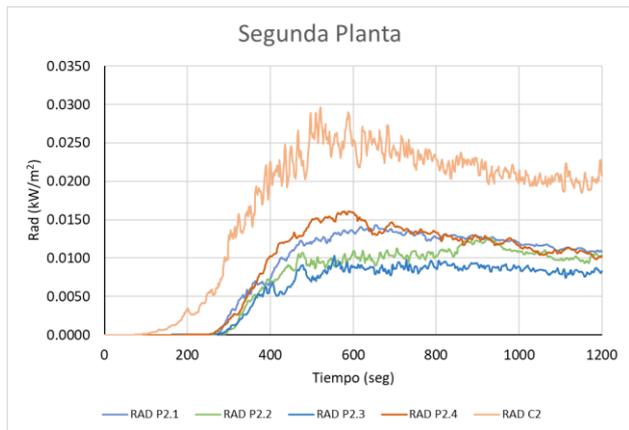


FIGURA 144 – RADIACIÓN EN PLANTA 2. CTE, CASO 1.

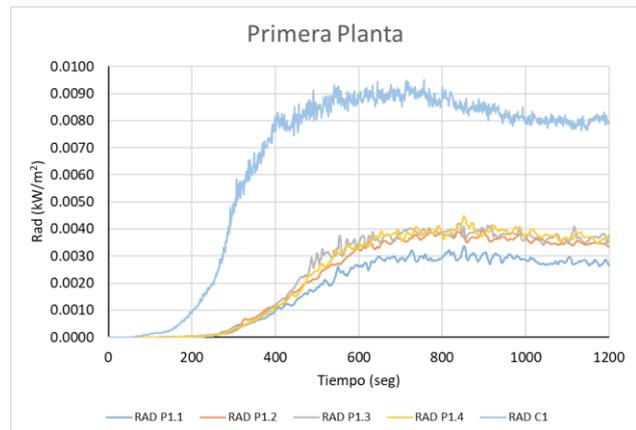


FIGURA 145 – RADIACIÓN EN PLANTA 1. CTE, CASO 1.

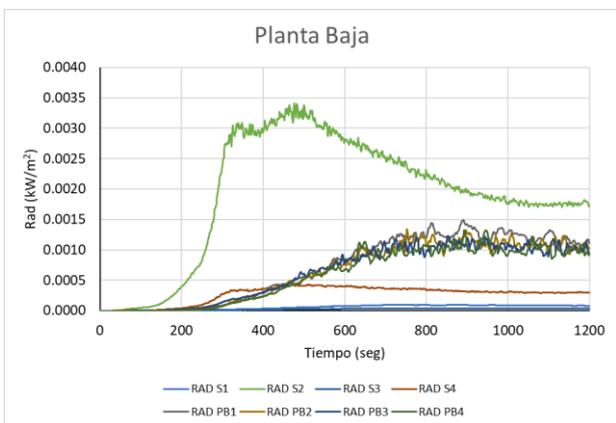


FIGURA 146 – RADIACIÓN EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 1.

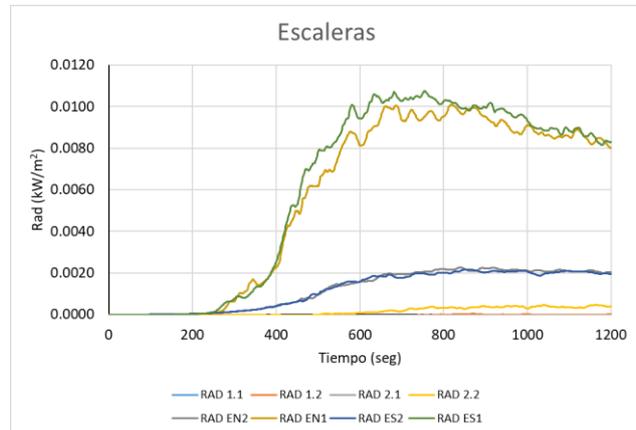


FIGURA 147 – RADIACIÓN EN ESCALERAS. CTE, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

**A.2. Escenario de incendio 2**

PC2 Temperatura: Slices en x=1.25, 4.25 m. En el resto de planos Slice no se detectan variaciones.

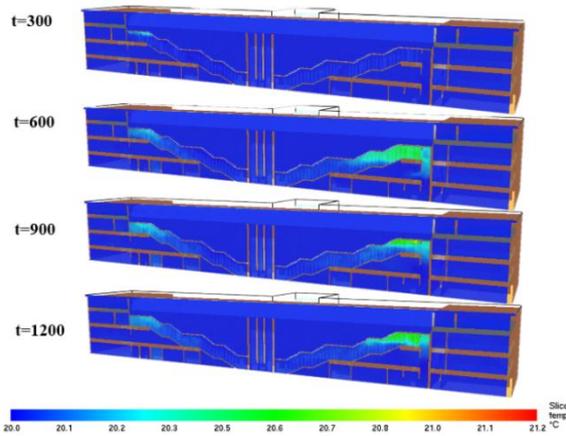


FIGURA 148 – TEMP. EN SLICE X= 1.25. CTE,CASO 2

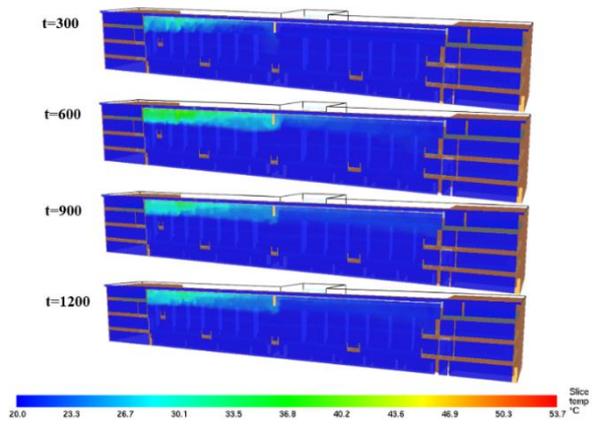


FIGURA 149 – TEMP. EN SLICE X= 4.25. CTE,CASO 2

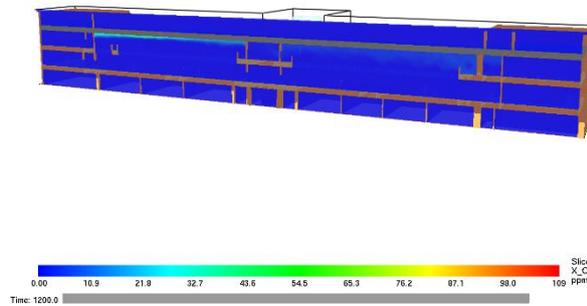


FIGURA 150 – TEMP. FINAL EN SLICE X= 8. CTE,CASO 2

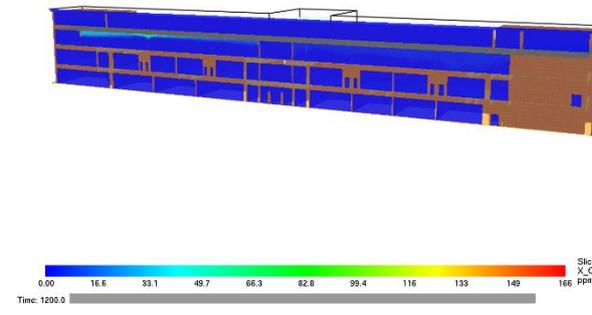


FIGURA 151 – TEMP. FINAL EN SLICE X= 10. CTE,CASO 2

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Mediciones de los Devices:

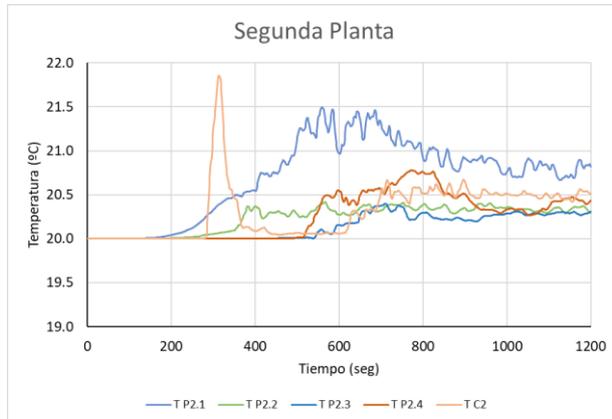


FIGURA 152 – TEMP EN PLANTA 2. CTE, CASO 2.

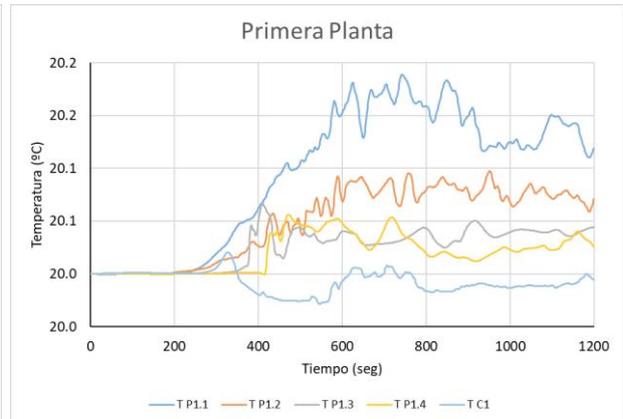


FIGURA 153 – TEMP EN PLANTA 1. CTE, CASO 2.

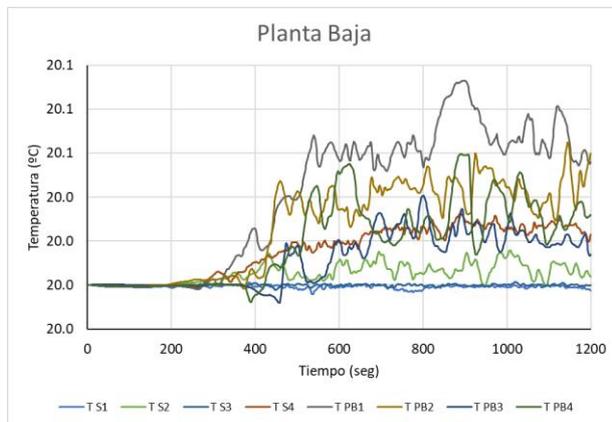


FIGURA 154 – TEMP EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 2.

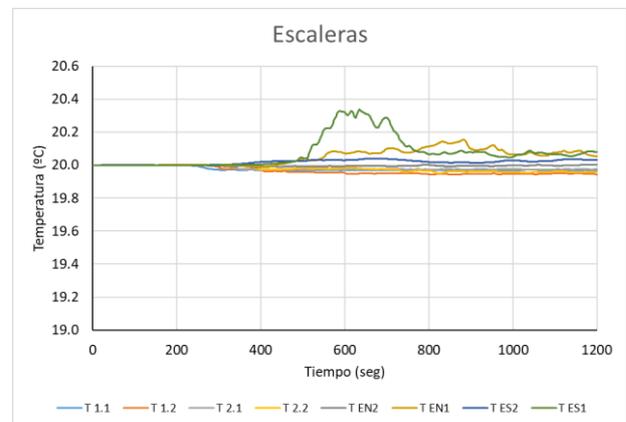


FIGURA 155 – TEMP EN ESCALERAS. CTE, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC3: Concentración de Oxígeno: las variaciones son muy pequeñas.

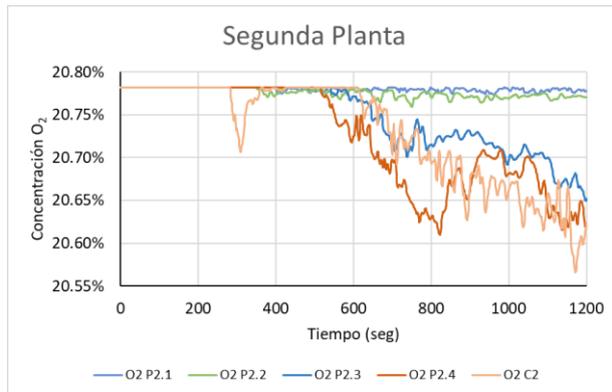


FIGURA 156 – OXÍGENO EN PLANTA 2. CTE, CASO 2.

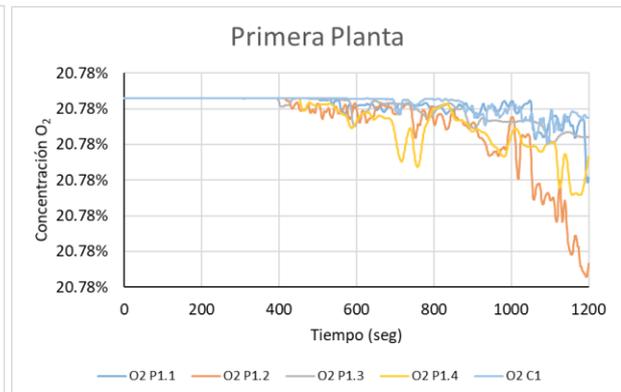


FIGURA 157 – OXÍGENO EN PLANTA 1. CTE, CASO 2.

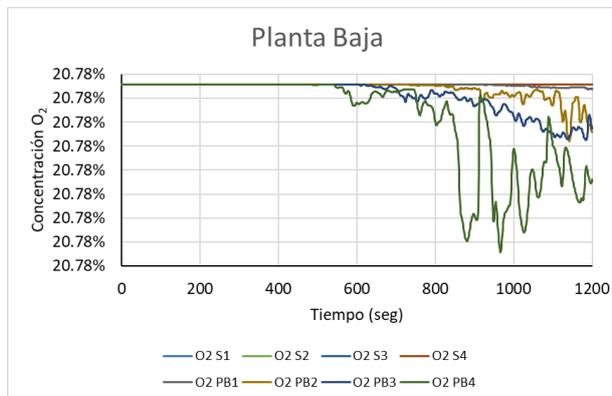


FIGURA 158 – OXÍGENO EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 2.

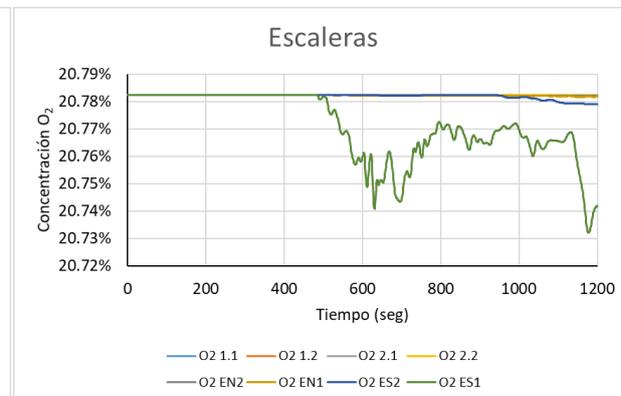


FIGURA 159 – OXÍGENO EN ESCALERAS. CTE, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC4, Concentración de Monóxido de Carbono: solo hay un pequeño aumento en los dos primeros Slices en  $x=1.25$  y  $4.25$  m:

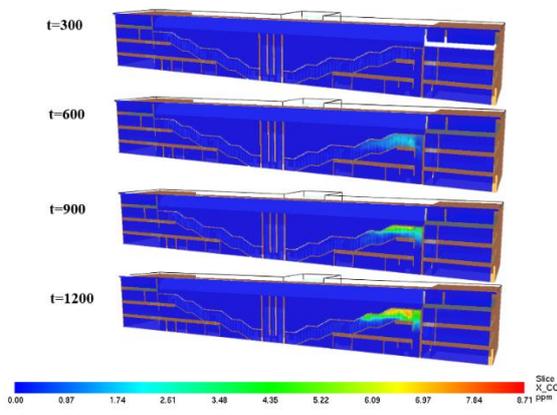


FIGURA 160 – CO EN SLICE  $x=1.25$ . CTE,CASO 2

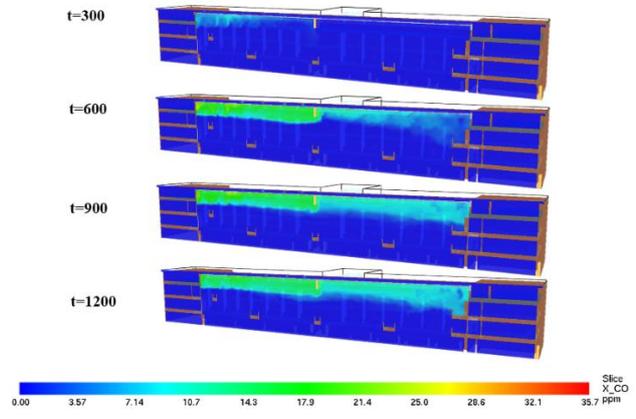


FIGURA 161 - CO EN SLICE  $x=4.25$ . CTE,CASO 2

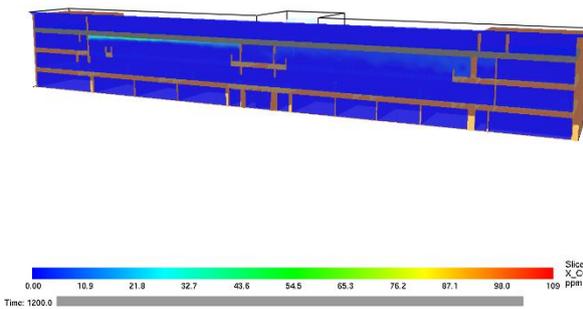


FIGURA 162 - CO FINAL EN SLICE  $x=8$ . CTE,CASO 2

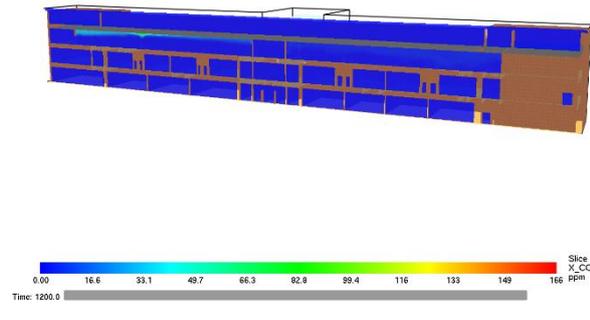


FIGURA 163 - CO FINAL EN SLICE  $x=10$ . CTE,CASO 2

Mediciones de los Devices:

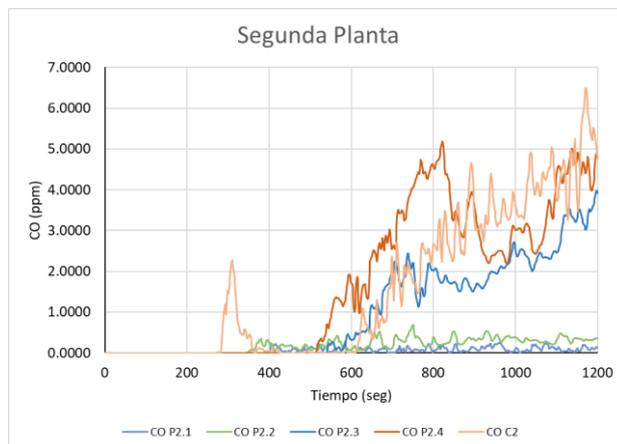


FIGURA 164 – CO EN PLANTA 2. CTE, CASO 2.

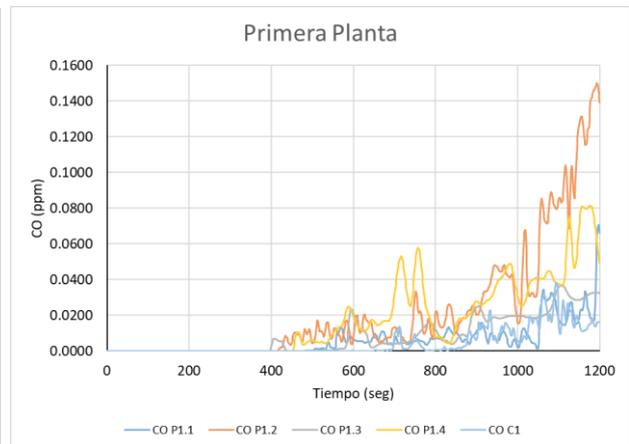


FIGURA 165 – CO EN PLANTA 1. CTE, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

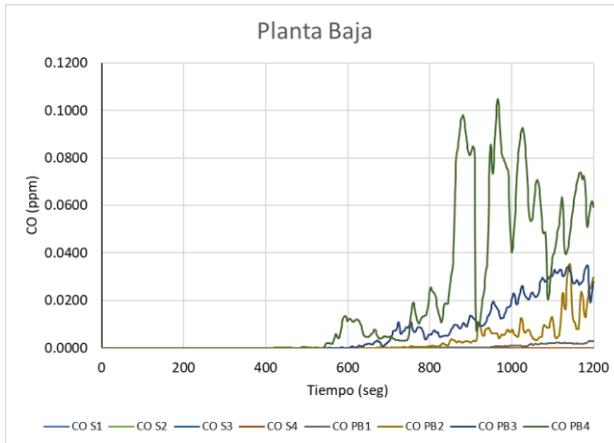


FIGURA 166 – CO EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 2.

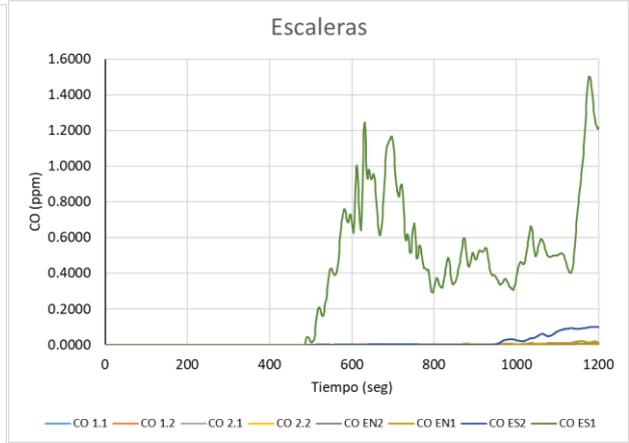


FIGURA 167 – CO EN ESCALERAS. CTE, CASO 2.

PC5, Concentración de Dióxido de Carbono: solo hay un pequeño aumento en los dos primeros Slices en  $x=1.25$  y  $4.25$  m

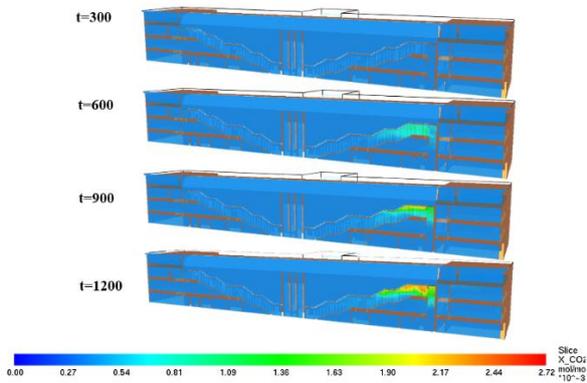


FIGURA 168 – CO2 EN SLICE X= 1.25. CTE, CASO 2

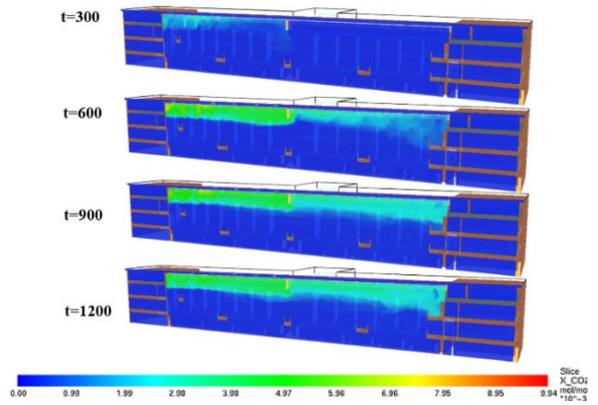


FIGURA 169 – CO2 EN SLICE X= 4.25. CTE, CASO 2

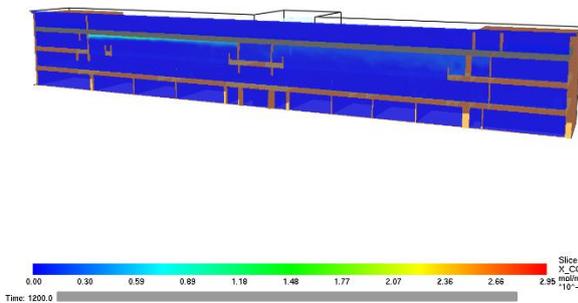


FIGURA 170 – CO2 FINAL EN SLICE X= 8. CTE, CASO 2

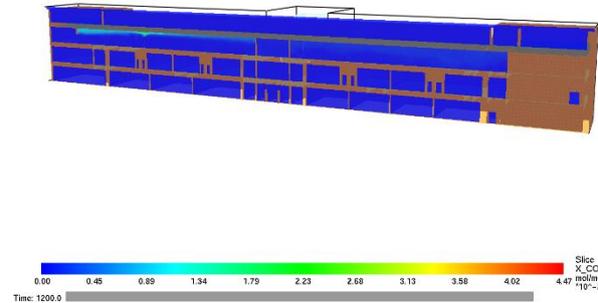


FIGURA 171 - CO2 FINAL EN SLICE X= 10. CTE, CASO 2

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Niveles de dióxido de carbono:

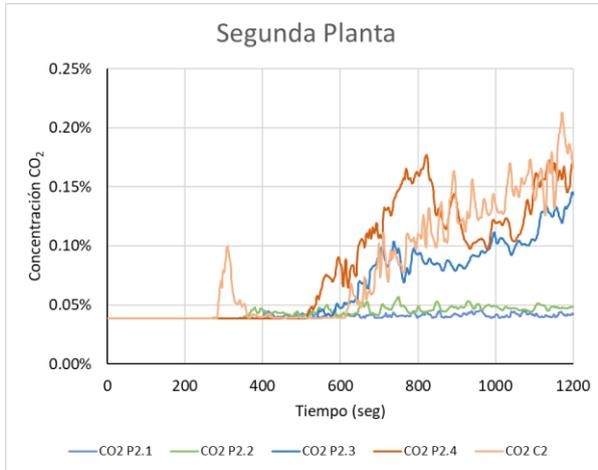


FIGURA 172 – CO2 EN PLANTA 2. CTE, CASO 2.

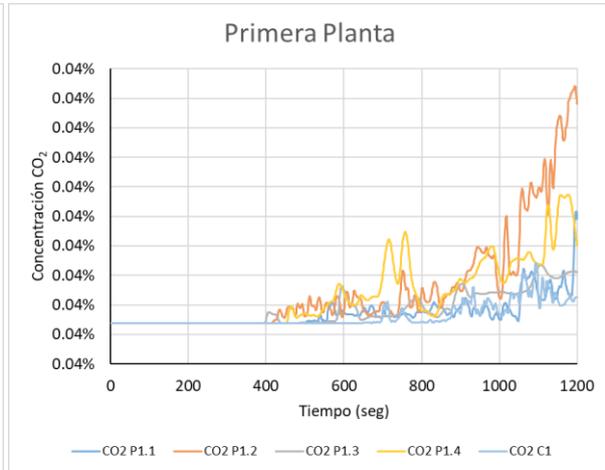


FIGURA 173 – CO2 EN PLANTA 1. CTE, CASO 2.

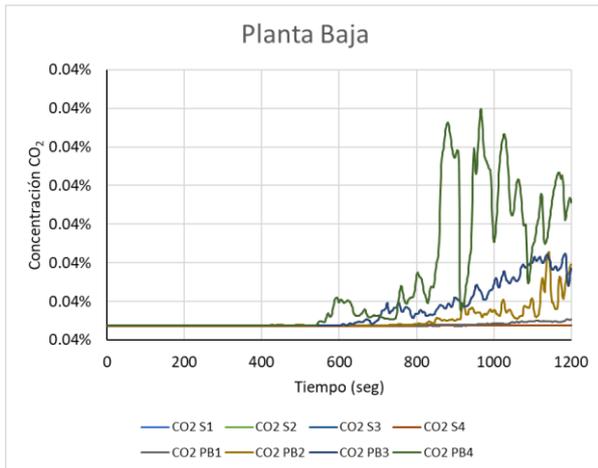


FIGURA 174 – CO2 EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 2.

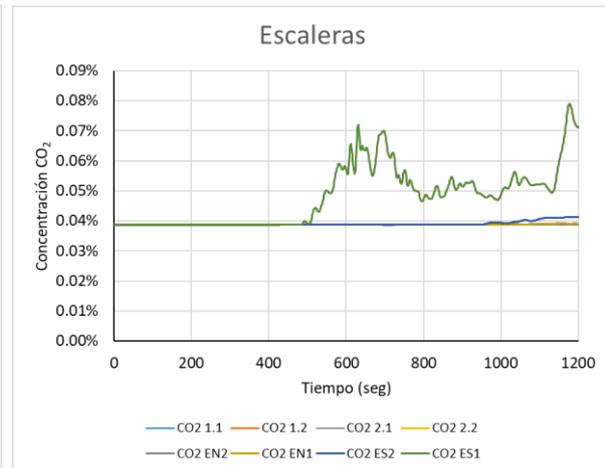


FIGURA 175 – CO2 EN ESCALERAS. CTE, CASO 2.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC6: Radiación

Niveles de radiación medidos por los Devices:

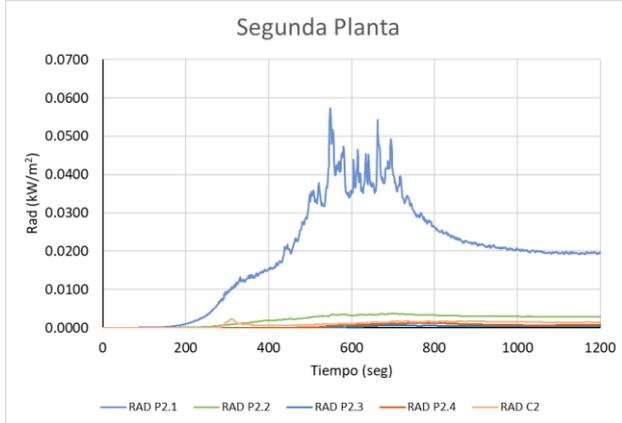


FIGURA 176 – RADIACIÓN EN PLANTA 2. CTE, CASO 2.

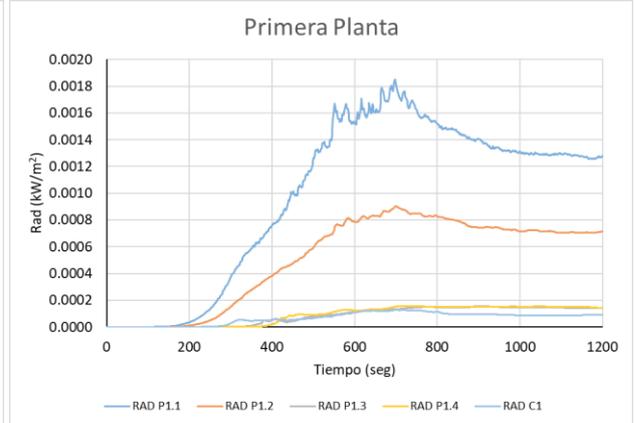


FIGURA 177 – RADIACIÓN EN PLANTA 1. CTE, CASO 2.

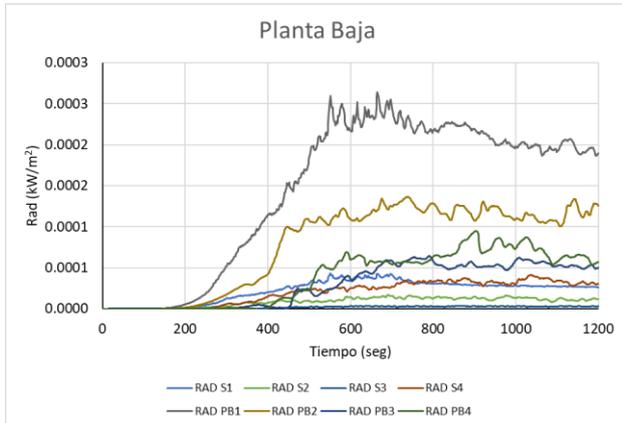


FIGURA 178 – RADIACIÓN EN PLANTA BAJA. CTE, CASO 2.

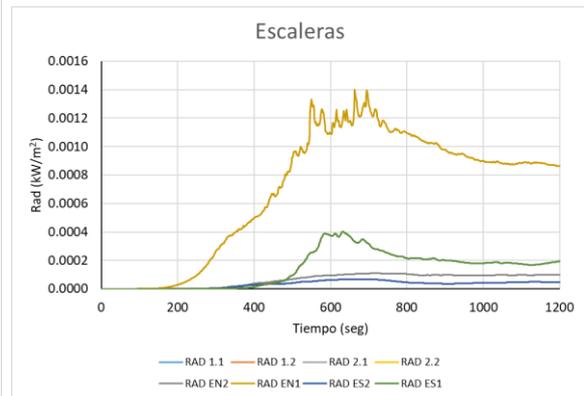


FIGURA 179 – RADIACIÓN EN ESCALERAS. CTE, CASO 2.

## ANEXO B – RESULTADOS DE LAS SOLUCIONES ALTERNATIVAS A Y B

### B.1. Escenario de incendio 1

#### B.1.1. Comportamiento de la solución alternativa A

PC2 Temperatura: Slices en x=1.25, 4.25, 8 y 10 metros.

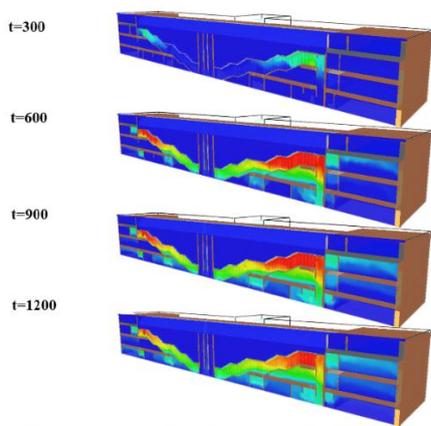


FIGURA 180 – TEMP EN SLICE X= 1.25. ALTERNATIVA A, CASO 1

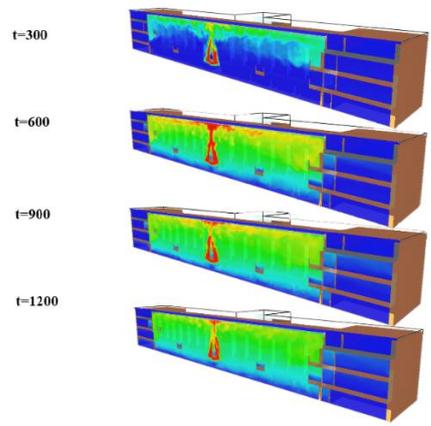


FIGURA 181 – TEMP EN SLICE X= 4.25. ALTERNATIVA A, CASO 1

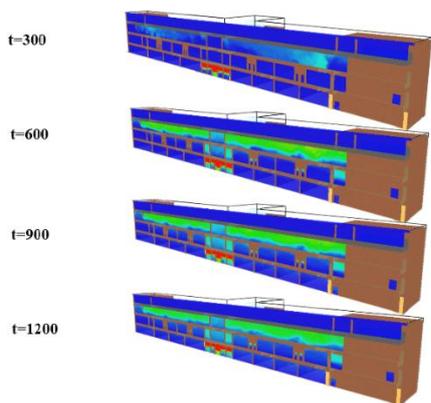


FIGURA 182 – TEMP EN SLICE X= 8. ALTERNATIVA A, CASO 1

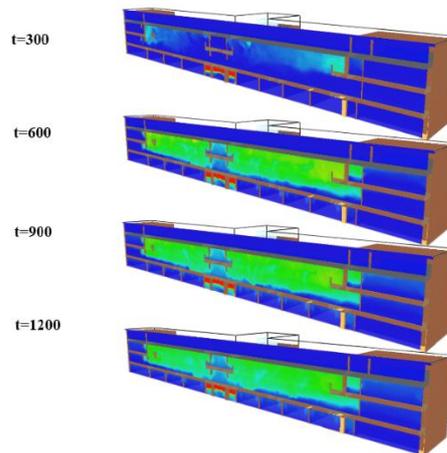


FIGURA 183 – TEMP EN SLICE X= 10. ALTERNATIVA A, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Niveles de temperatura medidos por los Devices:

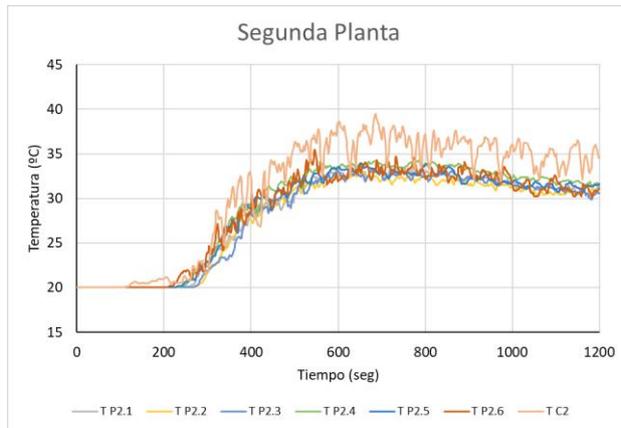


FIGURA 184 – TEMP. EN PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 1.

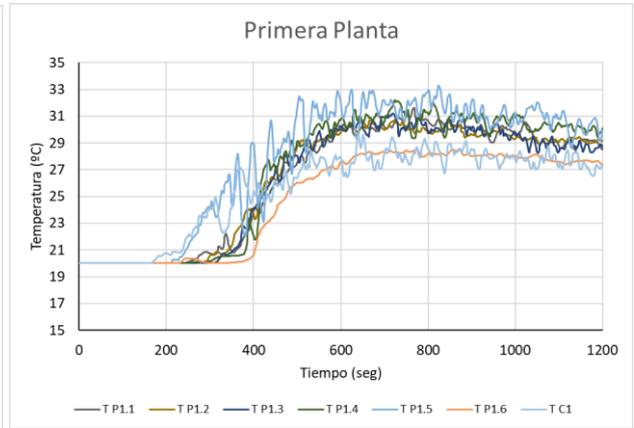


FIGURA 185 – TEMP. EN PLANTA 1. ALTERNATIVA A, CASO 1.

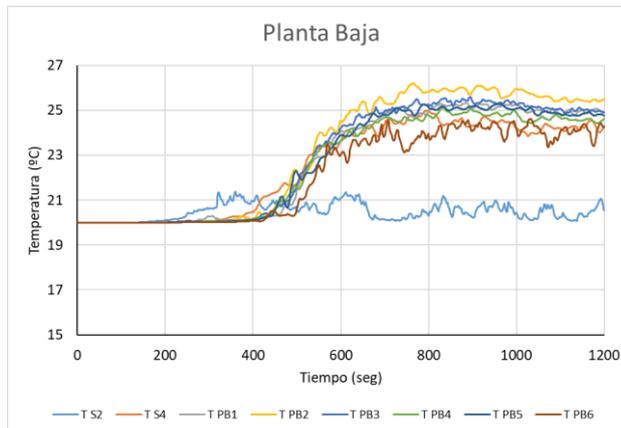


FIGURA 186 – TEMP. EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1.

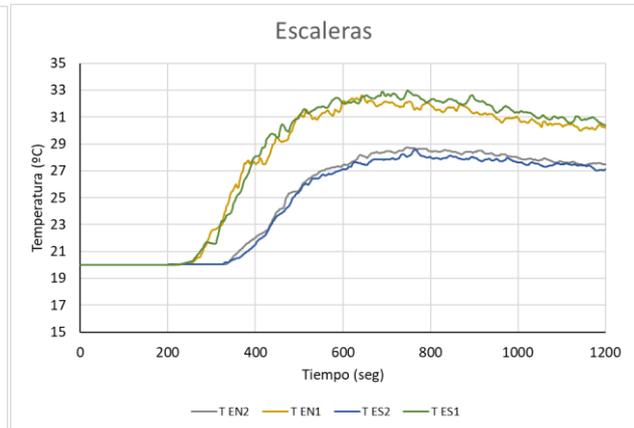


FIGURA 187 – TEMP. EN ESCALERAS. ALTERNATIVA A, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC3, Concentración de Oxígeno: los niveles permanecen constantes y no hay variaciones en los Slices.

Niveles de concentración de oxígeno medidos por los Devices:

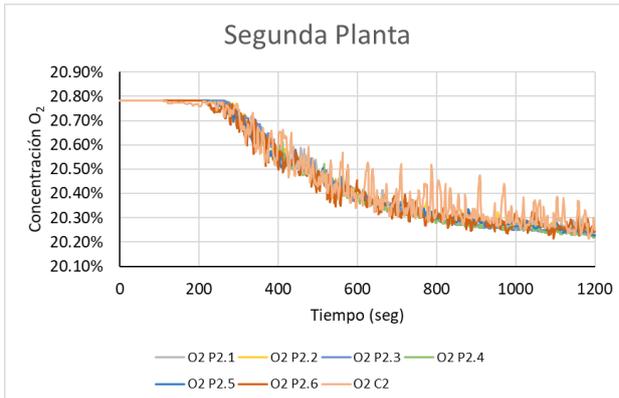


FIGURA 188 – O2 EN PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 1.

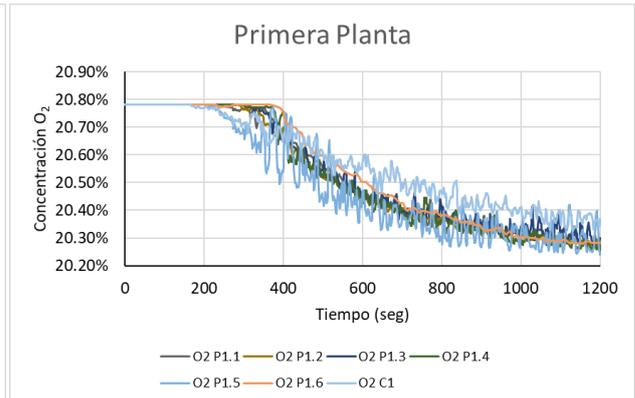


FIGURA 189 – O2 EN PLANTA 1. ALTERNATIVA A, CASO 1.

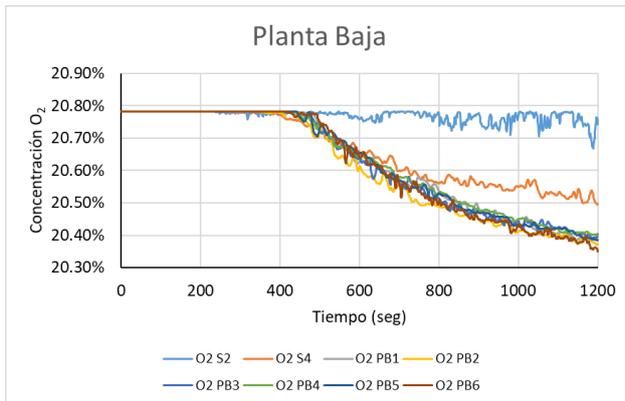


FIGURA 190 – O2 EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1.

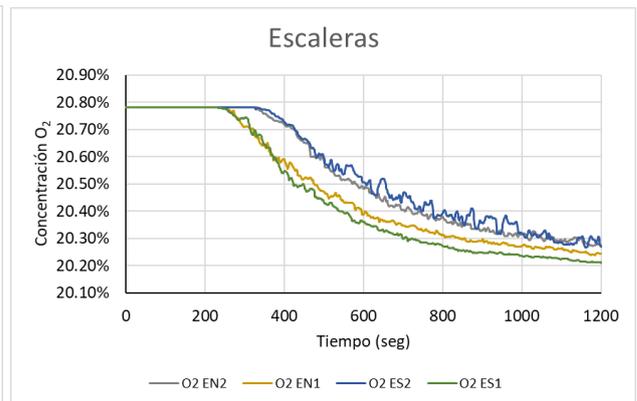


FIGURA 191 – O2 EN ESCALERAS. ALTERNATIVA A, CASO 1.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC4, Concentración de Monóxido de Carbono: sólo hay un aumento notable en los dos primeros Slices en  $x=1.25$  y  $4.25$  m.

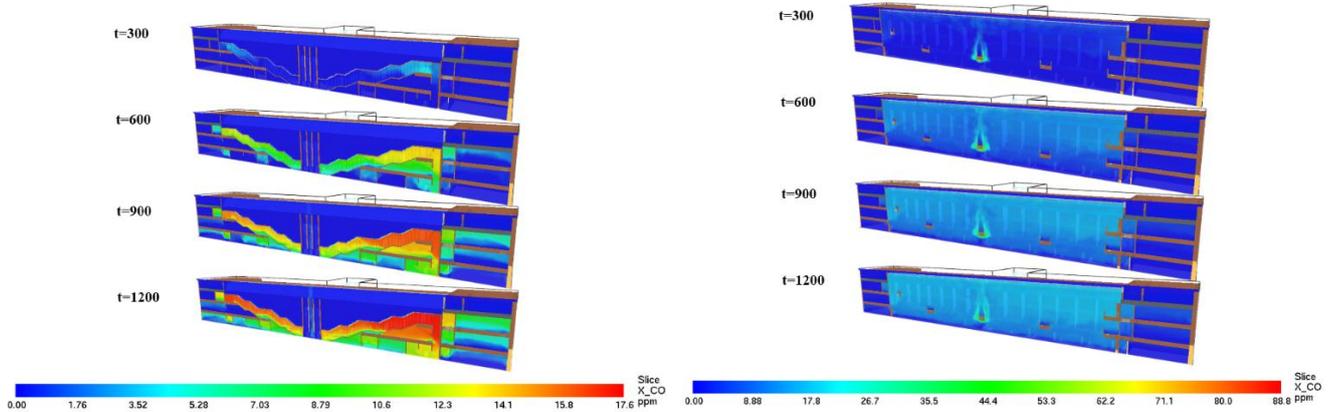


FIGURA 192 – CO EN SLICE X= 1.25. ALTERNATIVA A, CASO 1

FIGURA 193 – CO EN SLICE X= 4.25. ALTERNATIVA A, CASO 1

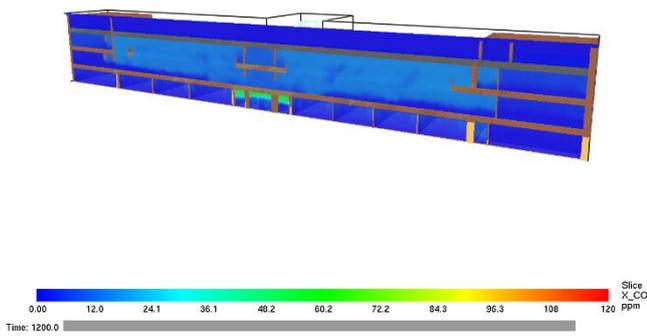


FIGURA 194 – CO FINAL EN SLICE X= 8. ALTERNATIVA A, CASO 1

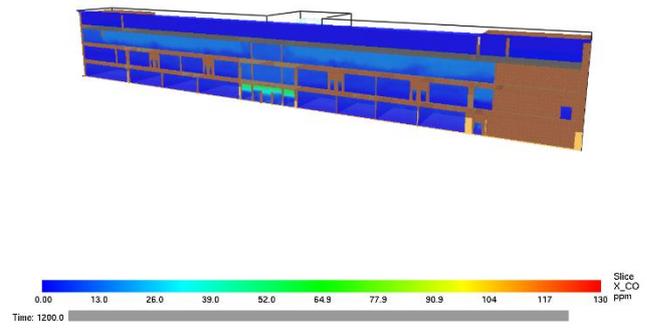


FIGURA 195 – CO FINAL EN SLICE X= 10. ALTERNATIVA A, CASO 1

Niveles de concentración de monóxido de carbono medidos por los Devices:

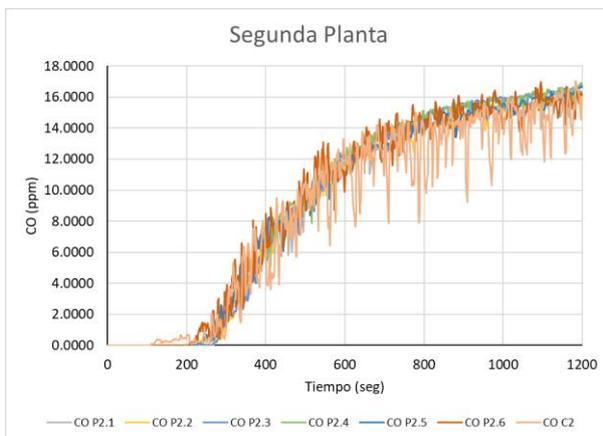


FIGURA 196 – CO EN PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 1.

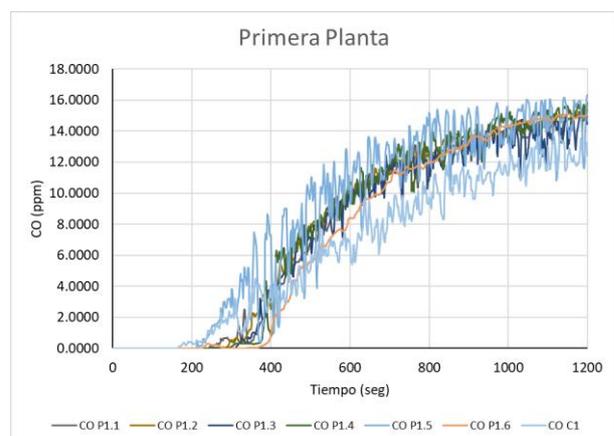


FIGURA 197 – CO EN PLANTA 1. ALTERNATIVA A, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

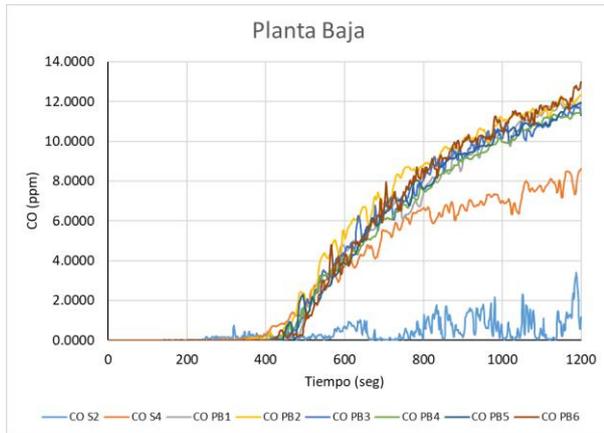


FIGURA 198 – CO EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1

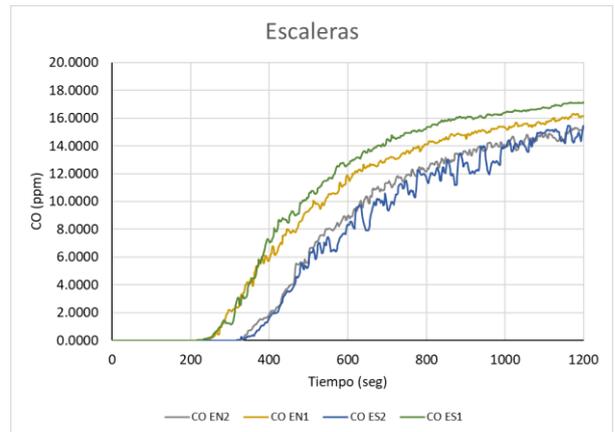


FIGURA 199 – CO EN ESCALERAS. ALTERNATIVA A, CASO 1

PC5, Concentración de Dióxido de Carbono: Slices en  $x=1.25, 4.25, 8$  y  $10$  m:

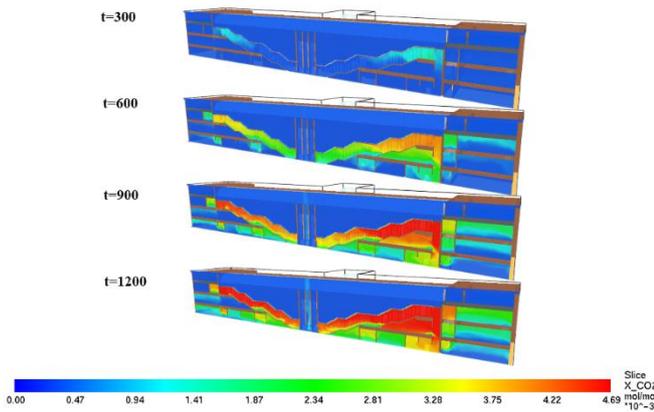


FIGURA 200 – CO2 EN SLICE  $x= 1.25$ . ALTERNATIVA A, CASO 1

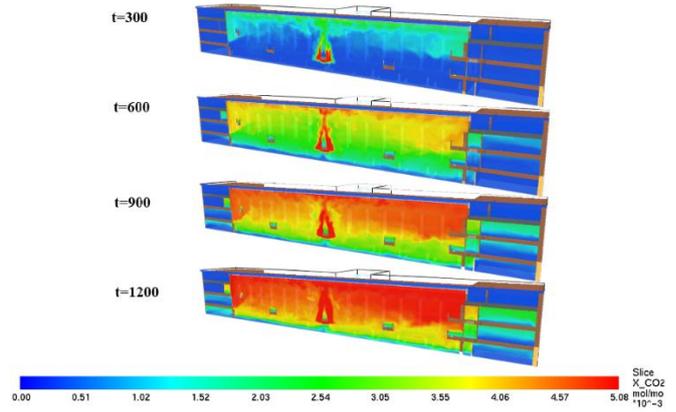


FIGURA 201 – CO EN SLICE  $x= 4.25$ . ALTERNATIVA A, CASO 1

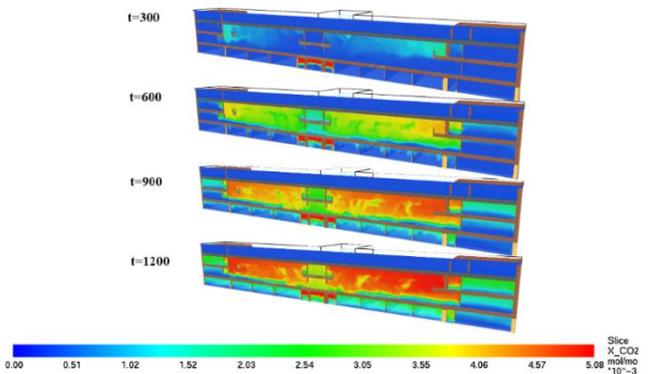


FIGURA 202 – CO EN SLICE  $x= 8$ . ALTERNATIVA A, CASO 1

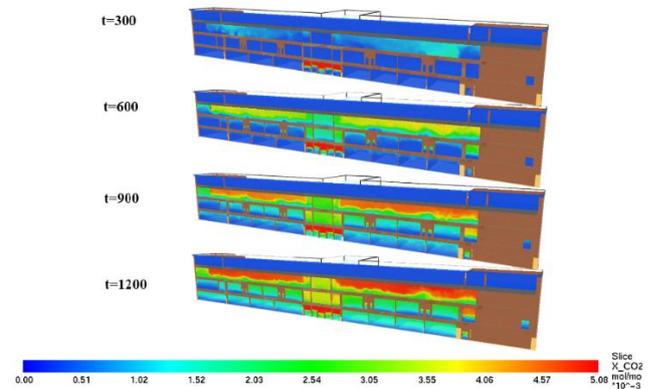


FIGURA 203 – CO EN SLICE  $x= 10$ . ALTERNATIVA A, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Niveles de concentración de dióxido de carbono medido por los Devices:

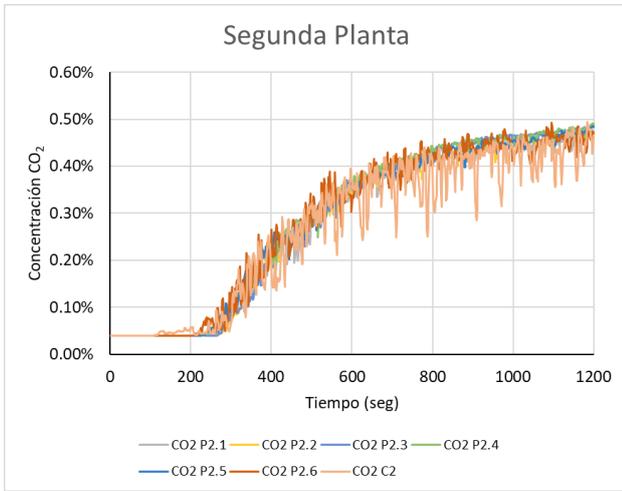


FIGURA 204 – CO2 EN PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 1

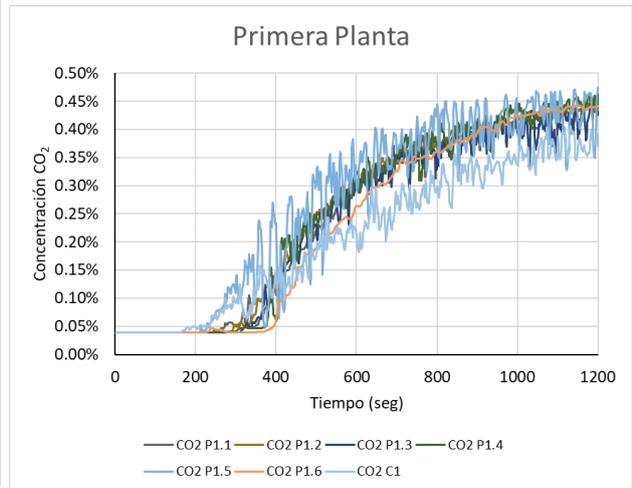


FIGURA 205 – CO EN PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 1

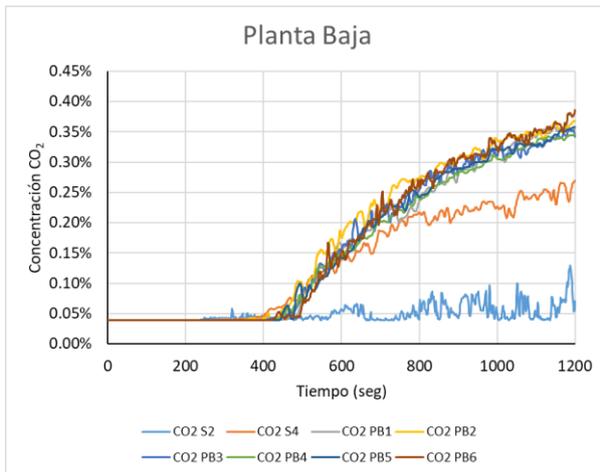


FIGURA 206 – CO EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1

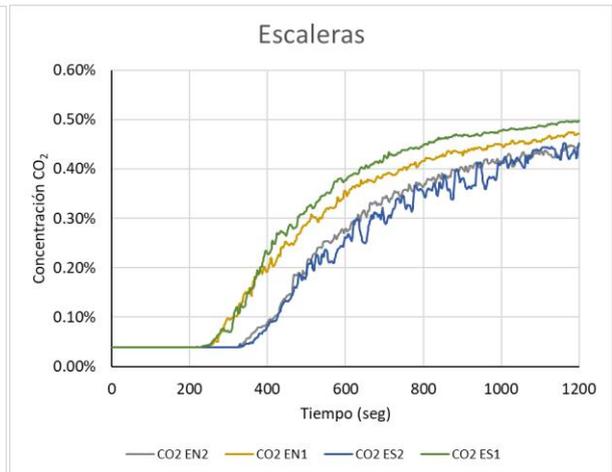


FIGURA 207 – CO EN ESCALERAS. ALTERNATIVA A, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC6: Radiación

Niveles de concentración de radiación medidos por los Devices:

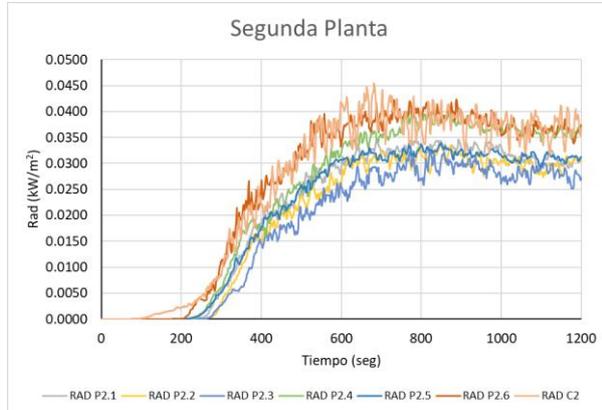


FIGURA 208 – RADIACIÓN EN PLANTA 2. ALTERNATIVA A, CASO 1

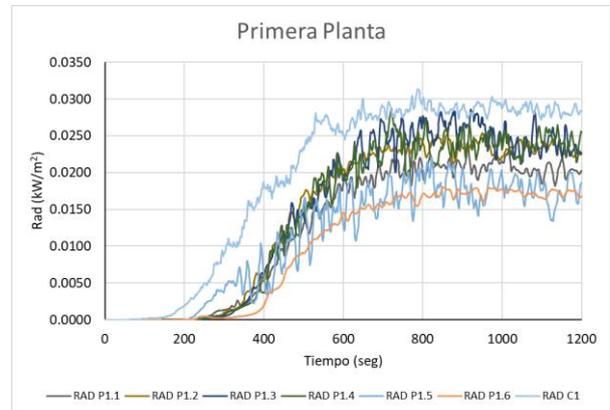


FIGURA 209 – RADIACIÓN EN PLANTA 1. ALTERNATIVA A, CASO 1

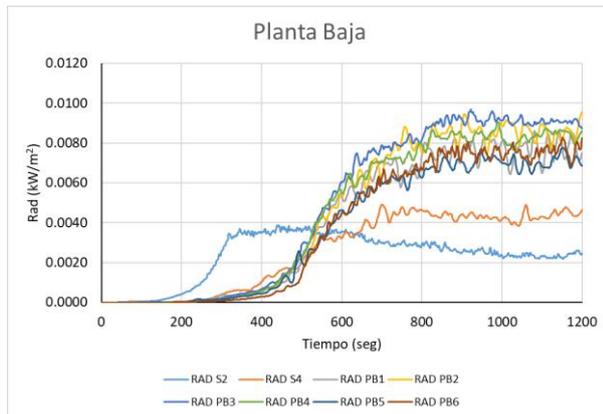


FIGURA 210 – RADIACIÓN EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA A, CASO 1

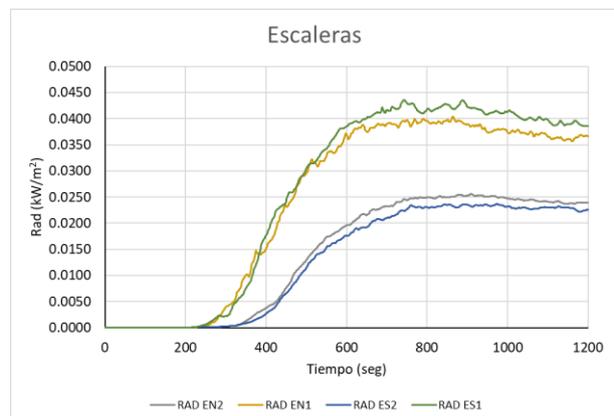


FIGURA 211 – RADIACIÓN EN ESCALERAS. ALTERNATIVA A, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

**B.1.2. Resultados de la solución alternativa B**

PC2, Temperatura: Slices en x=1.25, 4.25, 8 y 10 m:

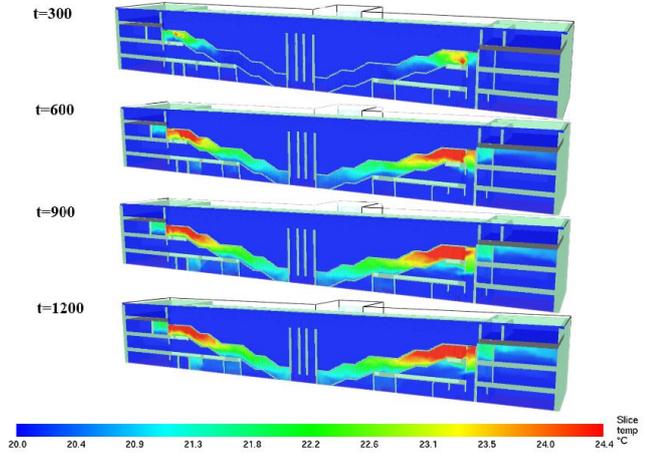


FIGURA 212 – TEMP. EN SLICE X= 1.25. ALTERNATIVA B, CASO 1

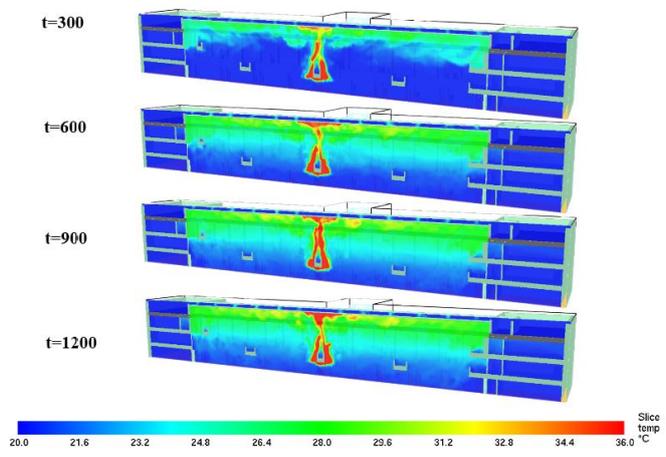


FIGURA 213 – TEMP. EN SLICE X= 4.25. ALTERNATIVA B, CASO 1

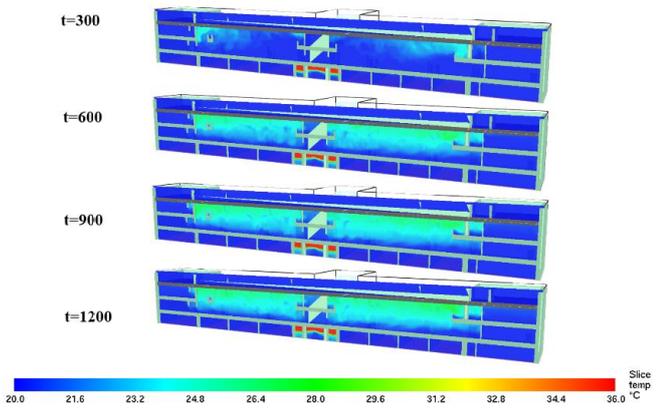


FIGURA 214 – TEMP. EN SLICE X= 8. ALTERNATIVA B, CASO 1

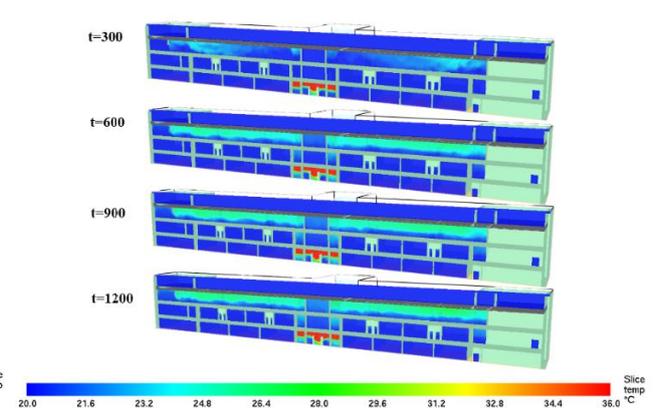


FIGURA 215 – TEMP. EN SLICE X= 10. ALTERNATIVA B, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Niveles de temperatura medidos por los Devices:

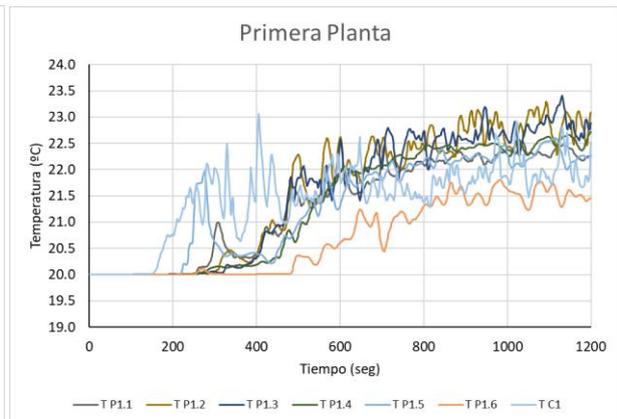
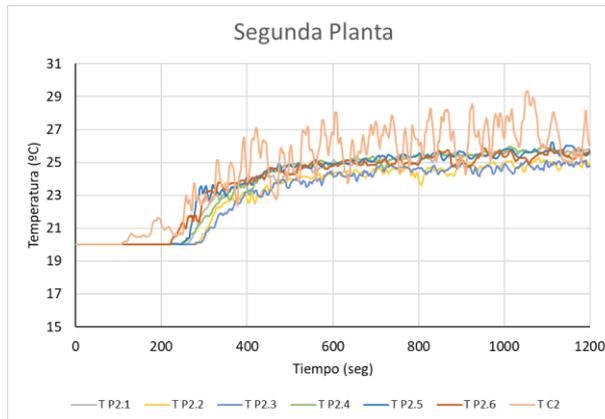


FIGURA 216 – TEMP. EN PLANTA 2. ALTERNATIVA B, CASO 1

FIGURA 217 – TEMP. EN PLANTA 1. ALTERNATIVA B, CASO 1

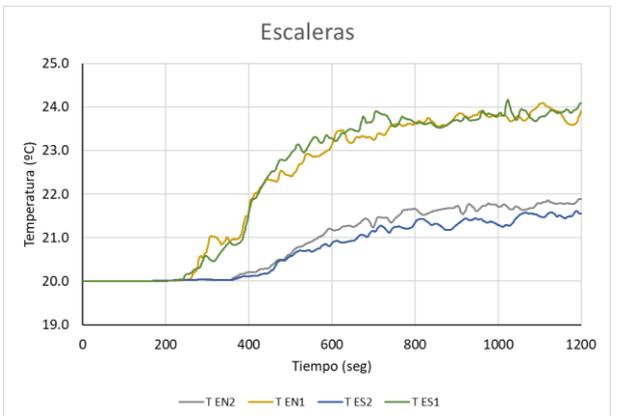
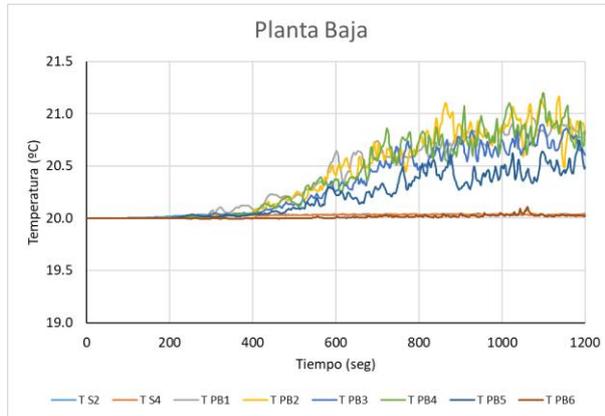


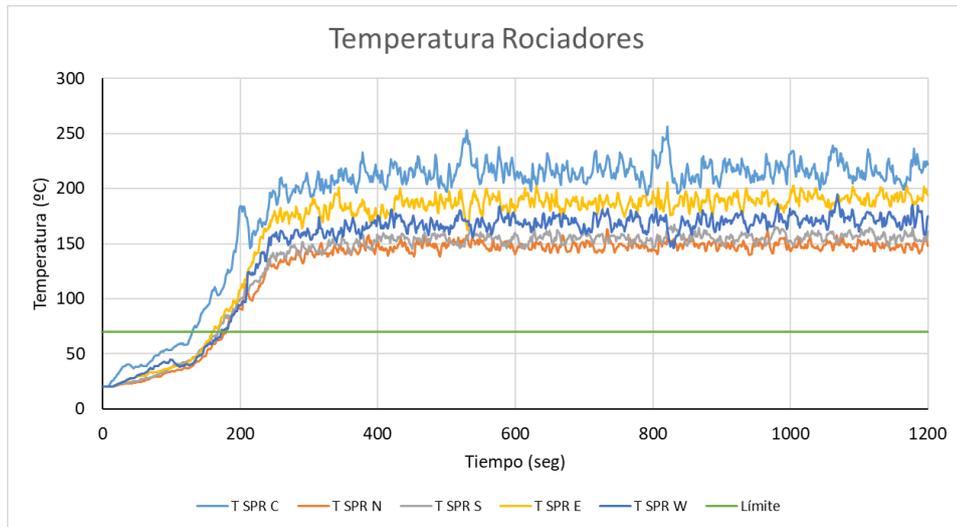
FIGURA 218 – TEMP. EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 1

FIGURA 219 – TEMP. EN ESCALERAS. ALTERNATIVA B, CASO 1

Se han realizado mediciones además de las temperaturas de los rociadores para comprobar los si los tiempos de activación supuestos a la hora de diseñar el incendio de diseño son correctos.

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Niveles de temperatura en los rociadores:



**FIGURA 220 – TEMPERATURAS DE LOS ROCIADORES. ALTERNATIVA B, CASO 1**

En la hipótesis realizada se suponía que el instante en que la temperatura de los rociadores pasaba de los 68 °C designados para su activación era a los 3 minutos. Según los resultados obtenidos, esta temperatura se alcanza hacia los 170 segundos. Además, se tomó como margen de seguridad un retraso de 1 minuto en este tiempo de activación. También se ve, para este instante de tiempo, que la temperatura en el centro del penacho, representado por la curva en azul claro correspondiente al punto de medida T SPR C, es de unos 120 °C, que concuerda con el valor calculado en la hipótesis de 123 °C. Con todo esto se acepta que la hipótesis de activación de los rociadores es correcta.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC3, Concentración de Oxígeno: Los niveles permanecen constantes y no hay variaciones en los Slices.

Niveles de concentración de oxígeno medidos por los Devices:

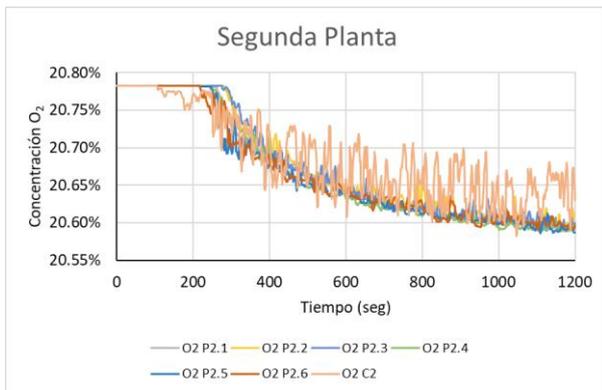


FIGURA 221 – O2 EN PLANTA 2. ALTERNATIVA B, CASO 1

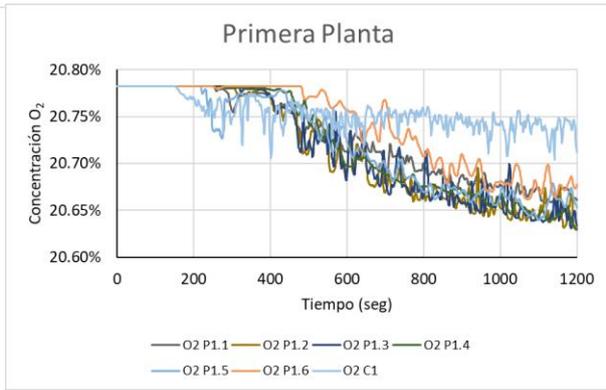


FIGURA 222 – O2 EN PLANTA 1. ALTERNATIVA B, CASO 1

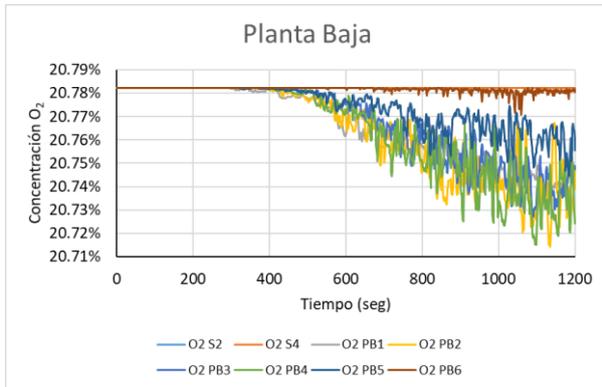


FIGURA 223 – O2 EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 1

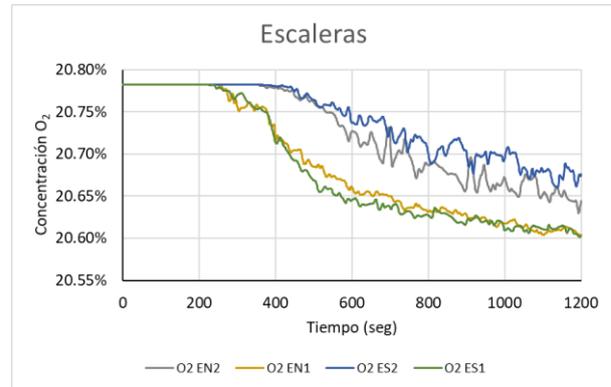


FIGURA 224 – O2 EN ESCALERAS. ALTERNATIVA B, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC4, Concentración de Monóxido de Carbono: Slice en x=1.25 m

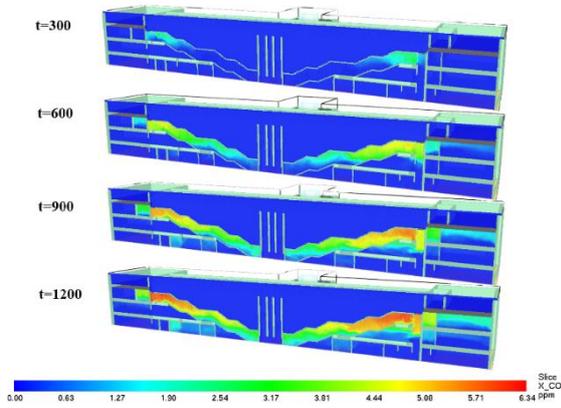


FIGURA 225 – CO EN SLICE X= 1.25. ALTERNATIVA B, CASO 1

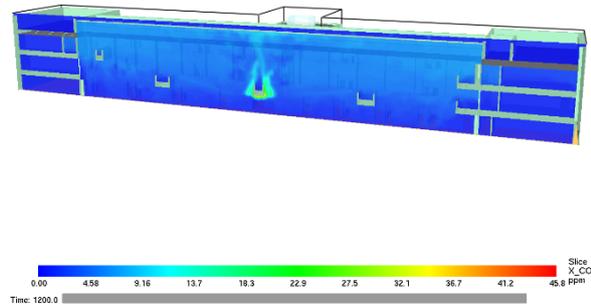


FIGURA 226 – CO FINAL EN SLICE X= 4.25. ALTERNATIVA B, CASO 1

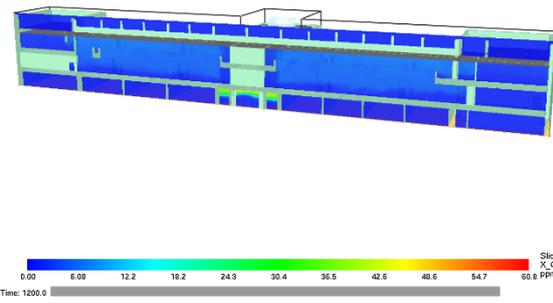


FIGURA 227 – CO FINAL EN SLICE X= 8. ALTERNATIVA B, CASO 1

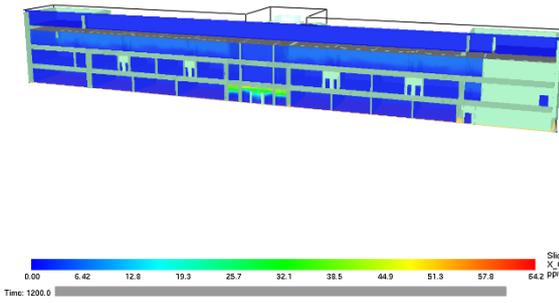


FIGURA 228 – CO FINAL EN SLICE X= 10. ALTERNATIVA B, CASO 1

Niveles de concentración de monóxido de carbono medidos por los Devices:

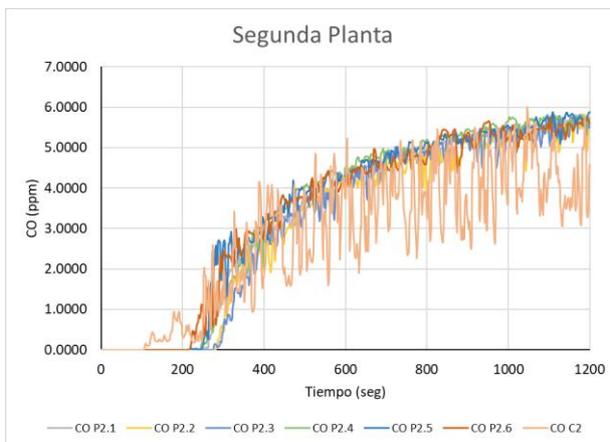


FIGURA 229 – CO EN PLANTA 2. ALTERNATIVA B, CASO 1

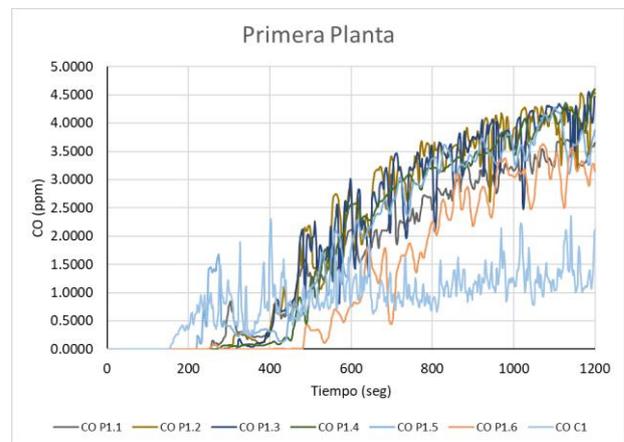


FIGURA 230 – CO EN PLANTA 1. ALTERNATIVA B, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

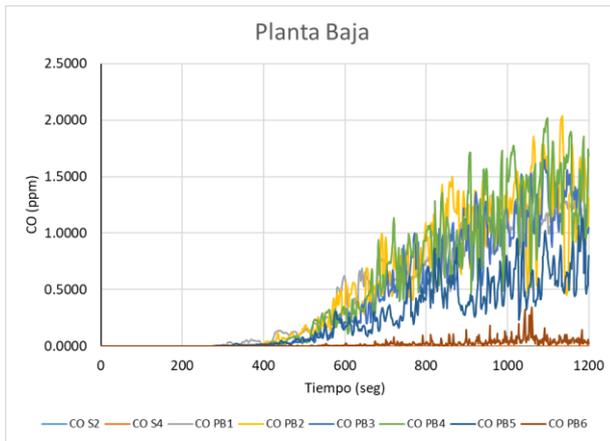


FIGURA 231 – CO EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 1

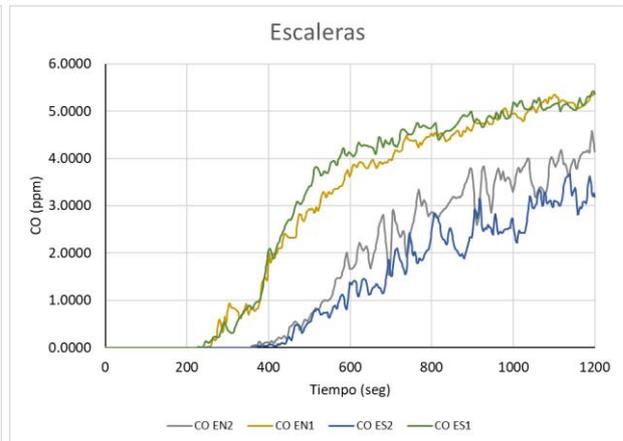


FIGURA 232 – CO EN ESCALERAS. ALTERNATIVA B, CASO 1

PC5, Concentración de Dióxido de Carbono: Slice en x=1.25 m

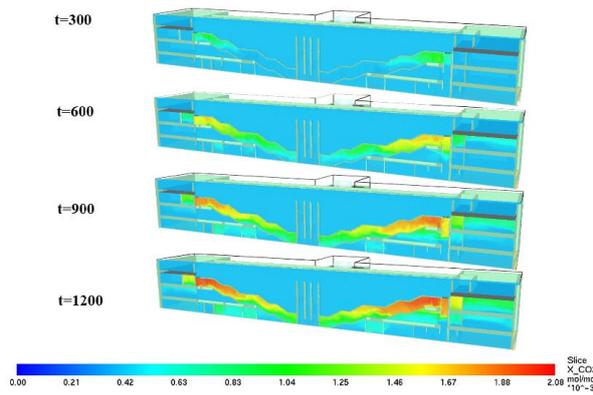


FIGURA 233 – CO2 EN SLICE X= 1.25. ALTERNATIVA B, CASO 1

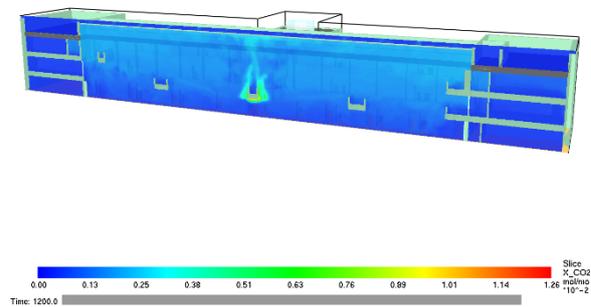


FIGURA 234 – CO2 FINAL EN SLICE X= 4.25. ALTERNATIVA B, CASO 1

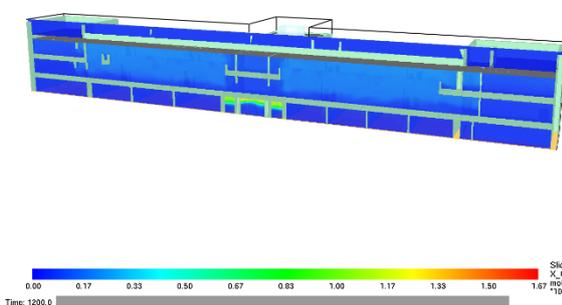


FIGURA 235 – CO2 FINAL EN SLICE X= 8. ALTERNATIVA B, CASO 1

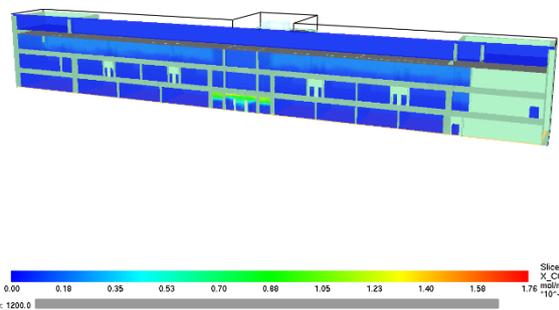


FIGURA 236 – CO2 FINAL EN SLICE X= 10. ALTERNATIVA B, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

Niveles de concentración de dióxido de carbono medidos por los Devices:

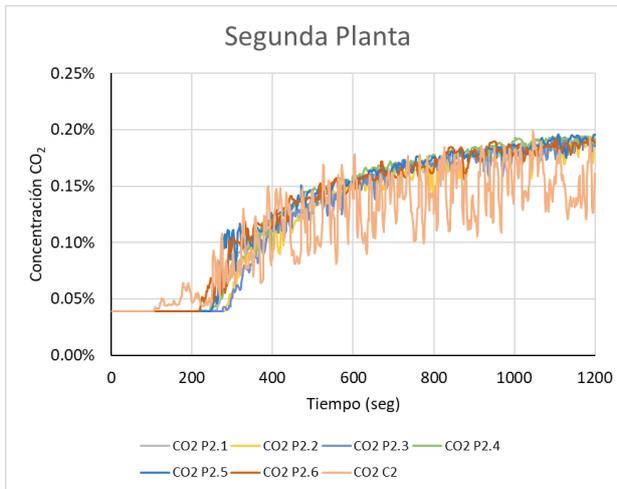


FIGURA 237 – CO2 EN PLANTA 2. ALTERNATIVA B, CASO 1

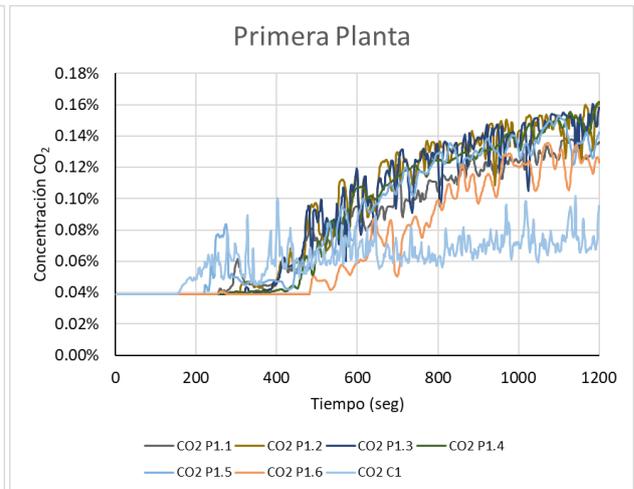


FIGURA 238 – CO2 EN PLANTA 1. ALTERNATIVA B, CASO 1

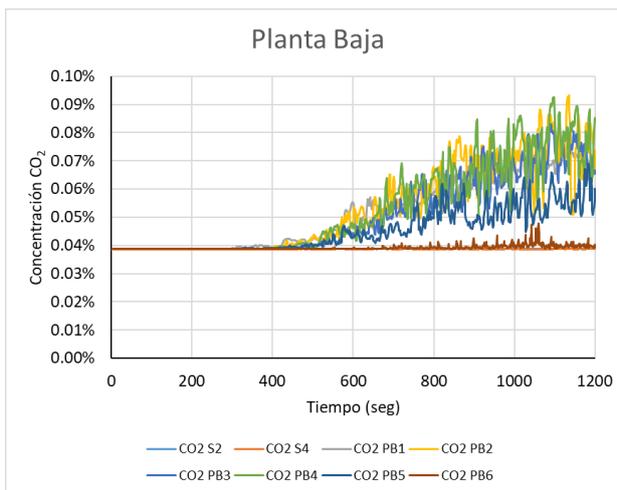


FIGURA 239 – CO2 EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 1

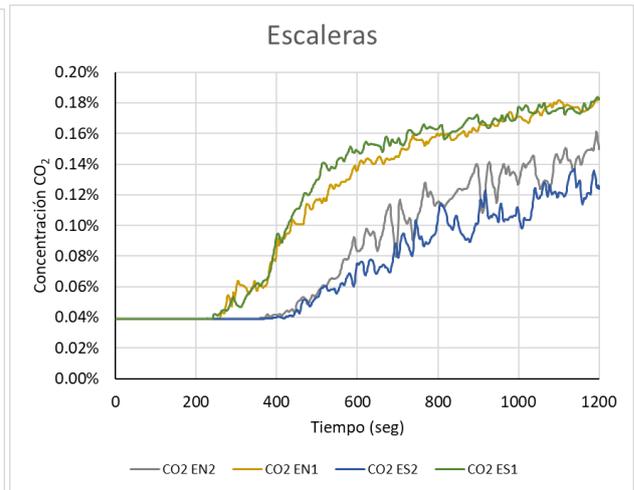


FIGURA 240 – CO2 EN ESCALERAS. ALTERNATIVA B, CASO 1

APLICACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN UN EDIFICIO DE USO DOCENTE.

PC6: Radiación

Niveles de concentración de radiación medidos por los Devices:

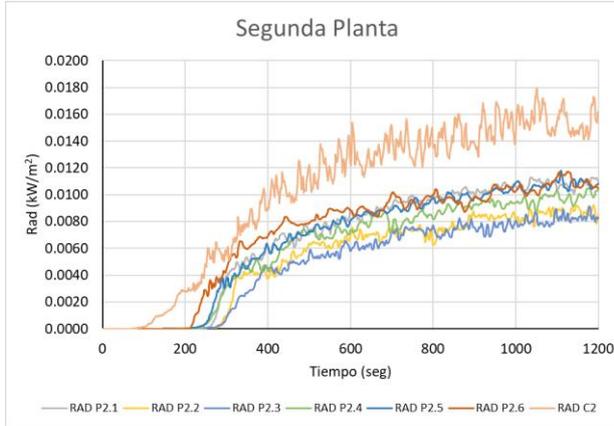


FIGURA 241 – RADIACIÓN EN PLANTA 2. ALTERNATIVA B, CASO 1

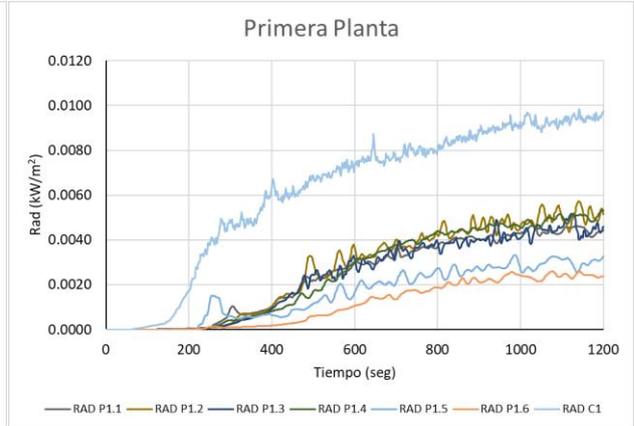


FIGURA 242 – RADIACIÓN EN PLANTA 1. ALTERNATIVA B, CASO 1

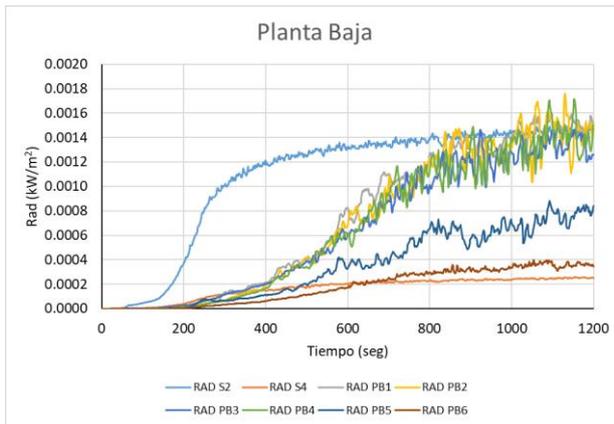


FIGURA 243 – RADIACIÓN EN PLANTA BAJA. ALTERNATIVA B, CASO 1

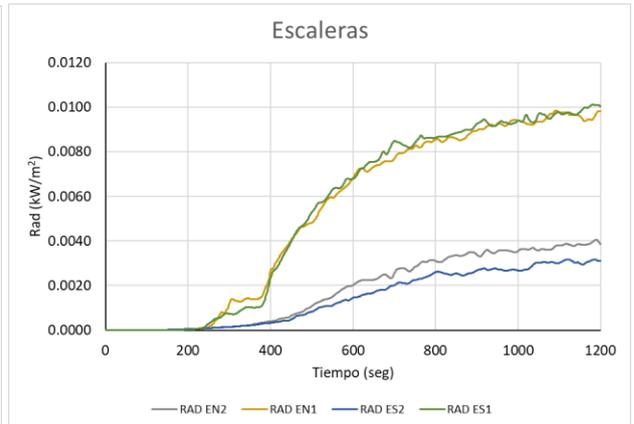


FIGURA 244 – RADIACIÓN EN ESCALERAS. ALTERNATIVA B, CASO 1