



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Fin de Máster

ESTUDIO DE LA MEJORA DE LA SEGURIDAD Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN TÚNEL DE
CARRETERA MEDIANTE LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN Y UNA
INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

STUDY OF THE IMPROVEMENT OF SAFETY AND ENERGY EFFICIENCY IN A ROAD TUNNEL
THROUGH THE INSTALLATION OF A VENTILATION SYSTEM AND A PHOTOVOLTAIC
INSTALLATION

Autor: Pablo Villaescusa Izquierdo

Tutor: J. Guillermo Rosas Mayoral

(Febrero, 2023)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
Trabajo de Fin de Máster

ALUMNO: Pablo Villaescusa Izquierdo

TUTOR: J. Guillermo Rosas Mayoral

Título: Estudio de la mejora de la seguridad y la eficiencia energética en un túnel de carretera mediante la instalación de un sistema de ventilación y una instalación fotovoltaica.

Title: Study of the improvement of safety and energy efficiency in a road tunnel through the installation of a ventilation system and a photovoltaic installation.

CONVOCATORIA: Febrero, 2023

RESUMEN:

Históricamente, los incendios en túneles de carretera son unos de los principales riesgos a los que se enfrenta esta infraestructura. Por ello, la normativa de aplicación sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles de carretera, el Real Decreto 635/2006, exige, entre otras instalaciones, en túneles interurbanos de cierta longitud, la implantación de un sistema de ventilación artificial que sea capaz de controlar el calor y el humo en caso de un incendio. En el presente TFM se ha estudiado la instalación y el diseño de un sistema de ventilación mecánico, de acuerdo con los requerimientos establecidos en las normativas y recomendaciones de aplicación, a través del cálculo y la simulación mediante modelos unidimensionales. Valiéndose de dichos modelos se ha elegido el diseño más adecuado de la ventilación a través del estudio de la evolución de la masa del humo en función del tiempo.

Por otra parte, el uso continuo de la iluminación en los túneles de carretera conduce a consumos energéticos muy elevados, por dicho motivo, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y en línea con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

aprobados por la Asamblea General de la ONU y la correspondiente Agenda 2030, se ha estudiado la implantación de un sistema propio de producción de energía mediante módulos fotovoltaicos. Se ha evaluado el entorno y la disponibilidad de espacio en zonas cercanas a las bocas de acceso al túnel de estudio, identificando aquellos emplazamientos óptimos para la generación de energía eléctrica renovable, a través de tecnología solar fotovoltaica.

ABSTRACT:

Historically, fires on road tunnels are one of the main risks faced by this infrastructure. As a result, the regulations of road tunnel's requirements on minimum safety applied in Spain (Real Decreto 635/2006), require the implementation of some ventilation system capable of controlling heat and smoke in the event of a fire in interurban tunnels of certain length, among other facilities. In this Master's Thesis the installation and design of a mechanic ventilation system has been studied, taking into account the requirements given by the application recommendations and regulations, via calculation and simulation of one-dimensional models. Using these models, the most suitable ventilation design has been selected through the study of the evolution of the smoke mass based on time.

Furthermore, the continuous lighting use in road tunnels leads to very high power consumption. Due to this, the implementation of a particular energy production system through photovoltaic modules has been addressed aiming to improve the energy efficiency, according to the Sustainable Development Goals (SDG) approved by the United Nations General Assembly and their corresponding 2030 Agenda. Moreover, the environment and space availability in nearby areas to the studied tunnel entrances have been assessed, identifying those optimal placements designated for the generation of renewable electrical energy, through photovoltaic solar technology.

Palabras clave: Ventilación; fotovoltaica; túnel; eficiencia energética; seguridad.

Firma del alumno:	VºBº Tutor:
--------------------------	--------------------

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de León, por hacer posible que esta titulación se pueda llevar a cabo en la modalidad por videoconferencia, tan necesaria para los que queremos seguir formándonos, compaginándolo con nuestro trabajo.

A mi tutor, Guillermo Rosas Mayoral, quien ha mostrado una total disposición a ayudarme con este trabajo.

No quiero olvidarme de los compañeros que tuve en mi primera experiencia laboral, quienes me enseñaron con su entrega e ilusión lo apasionante que es el mundo de los túneles de carretera.

Y, por último, y siendo lo más importante, quiero agradecer a mi familia todo el apoyo que me han dado durante este tiempo, y en especial, a mi madre y a mi hermano, quienes siempre han estado a mi lado en los momentos que realmente lo necesitaba. Una parte de este trabajo es vuestro.

Índice de contenidos

1	INTRODUCCIÓN	18
2	ESTADO DEL ARTE.....	22
2.1	PROBLEMÁTICA DE LOS TÚNELES.....	22
2.1.1	SEGURIDAD.....	22
2.1.2	EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	27
2.2	VENTILACIÓN EN TÚNELES DE CARRETERA	32
2.2.1	GENERALIDADES.....	32
2.2.2	COMPORTAMIENTO DEL HUMO	33
2.2.3	TIPOS DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN.....	35
2.3	NORMATIVA SOBRE TÚNELES.....	44
2.3.1	SISTEMA DE VENTILACIÓN	44
2.3.2	ENERGÍAS RENOVABLES	60
3	CASO DE ESTUDIO.....	63
3.1	INTRODUCCIÓN.....	63
3.2	DATOS CARACTERÍSTICOS.....	66
3.2.1	CARACTERÍSTICAS GEÓMETRICAS.....	66
3.2.2	CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO.....	68
3.2.3	CARACTERÍSTICAS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO	69
3.3	SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	70
3.3.1	ESTADO ACTUAL	70
3.3.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN ELEGIDO	70
3.3.3	METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DIMENSIONAMIENTO	71
3.3.4	DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN SANITARIA O DE CONFORT	74
3.3.5	DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN EN CASO DE INCENDIO.....	91
3.4	SUMINISTRO MEDIANTE ENERGÍA FOTOVOLTAICA	156
3.4.1	INTRODUCCIÓN	156
3.4.2	EMPLAZAMIENTO DE LA PLANTA FOTOVOLTAICA.....	156
3.4.3	ESTUDIO POTENCIAL SOLAR.....	164
3.4.4	ANÁLISIS DE CONSUMOS.....	165
3.4.5	MÓDULO FOTOVOLTAICO	172
3.4.6	DISTRIBUCIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS MÓDULOS	176
3.4.7	INVERSOR.....	180

3.4.8	DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN.....	186
3.4.9	VERIFICACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE SOFTWARES DE DISEÑO	221
4	CONCLUSIONES.....	232
4.1	SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	232
4.2	INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA	235
5	BIBLIOGRAFÍA	238
6	ANEXOS.....	242
	ANEXO I. CÁLCULOS DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN LONGITUDINAL EN CASO DE INCENDIO.	243
	ANEXO II. ESTUDIO ENERGÉTICO	264
	ANEXO III. RESULTADOS PVGIS	277
	ANEXO IV. RESULTADOS HELIOSCOPE.....	279
	ANEXO V. RESULTADOS PVSYSYSTEM.....	283
	ANEXO VI. FICHAS TÉCNICAS DE EQUIPOS	291

Índice de figuras

Figura 1.1. Relación entre el coste de mantenimiento y la influencia de las distintas fases. [2].....	20
Figura 2.1. Incendio en el túnel de San Gotardo (Suiza) el 24/10/2001 [4].....	24
Figura 2.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Fuente: web oficial de la ONU.....	29
Figura 2.3. Esquema desarrollo del incendio en túneles	33
Figura 2.4. Velocidad reducida	34
Figura 2.5. Velocidad más elevada.	34
Figura 2.6. Ventilación longitudinal con ventiladores de turbina o chorro [13].....	36
Figura 2.7. Jet fans instalados en parejas en el túnel de Vielha (Alfons XIII). Fuente: elaboración propia.....	37
Figura 2.8. Ventilación longitudinal con inyector tipo Saccardo [13]	37
Figura 2.9. Sistema de extracción masiva por un punto [13].....	38
Figura 2.10. Conducto de ventilación en la parte superior de un túnel con rejillas de ventilación [14].....	39
Figura 2.11. Ventilación semitransversal con trampillas exutorias operadas remotamente [13].....	40
Figura 2.12. Sistema de ventilación transversal con suministro y extracción de aire uniforme [13].....	40
Figura 2.13. Ventilación transversal con trampillas exutorias operadas remotamente Fuente: elaboración propia.	41
Figura 2.14. Tipos de sistemas de ventilación [15]	41
Figura 2.15. Túnel unidireccional sin congestión. Ventilación longitudinal.....	43
Figura 2.16. Clasificación de túneles viales por longitud y TPD en Colombia [21].....	59
Figura 2.17. Túnel de la Rovira. Instalación de planta FV en boca sur. Fuente: https://ajuntament.barcelona.cat/	61
Figura 2.18. Túnel de Villa Olímpica. Fuente: Proyecto de mejora del túnel.....	62
Figura 3.1 Situación. Túnel de Erinyà	63
Figura 3.2. Fotografía aérea.	66
Figura 3.3. Fotografía de entrada al túnel. Fuente: Fotografía propia	66
Figura 3.4. Sección transversal del túnel de Erinyà. Fuente: Proy. Modificado 07/1996 ...	67
Figura 3.5. Vista del macizo de Erinyà y entrada al túnel por boca norte. Fuente: Fotografía propia.....	71
Figura 3.6. Tramo túnel de Erinyà y estación de tráfico más cercana (Fuente: Mapa de Tráfico del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana).....	76

Figura 3.7. Datos históricos de tráfico estación L-32-1. Fuente: elaboración propia.	78
Figura 3.8. Estimación del tráfico. Fuente: elaboración propia.	78
Figura 3.9. Análisis de tráfico de veh. pesados. Fuente: elaboración propia.....	79
Figura 3.10. Demanda de aire de cada contaminante. Fuente: elaboración propia.	89
Figura 3.11. Requisitos nivel de servicio. Efecto pistón y nº de ventiladores. Fuente: elaboración propia.....	90
Figura 3.12. Relación entre la potencia de incendio y la velocidad crítica. Modelo Kennedy. Fuente: elaboración propia.	93
Figura 3.13. Valores de potencia calorífica disipada en un incendio para diferentes tipos de vehículos [29].....	97
Figura 3.14. Curvas de incendio. Ensayos reales Benelextunnel / Runehamar	97
Figura 3.15. Curva evolución de la potencia de incendio [31]	98
Figura 3.16. Curva normalizada de potencia de incendio 100MW [32].....	100
Figura 3.17. Rosa de los vientos. Estación meteorológica de La Pobla de Segur. Fuente: Servei Meteorològic de Catalunya	107
Figura 3.18. Componentes del Jet fan. Fuente: Catálogo ZITRÓN	120
Figura 3.19. Jet fan. Fuente: Catálogo fabricante ZITRÓN-2022.....	120
Figura 3.20. Localización ventiladores. Fuente: elaboración propia.....	121
Figura 3.21. Posicionamiento de los ventiladores. Fuente: elaboración propia a partir de catálogo de fabricante.....	121
Figura 3.22. Resultados para los sistemas de ventilación propuestos. Fuente: elaboración propia.....	127
Figura 3.23. Resultados: Margen del sistema de ventilación. Fuente: elaboración propia	128
Figura 3.24. Curva de incendio considerada en CAMATT. Fuente: elaboración propia ...	130
Figura 3.25. Modelo unidimensional del túnel de Erinyà. Software: CAMATT. Fuente: elaboración propia.....	131
Figura 3.26. Evolución de la presión.....	135
Figura 3.27. Velocidad del aire. Régimen transitorio. Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW	136
Figura 3.28. Velocidad del aire en función de la longitud del túnel y tiempo (CAMATT). Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW. Fuente: elaboración propia.	137
Figura 3.29. Velocidad del aire (CAMATT). Régimen transitorio. Pot.inc.:200MW. 6 vent. de 55kW. Fuente: elaboración propia.....	138
Figura 3.30. Efecto de retroceso de humos por velocidad inferior a la crítica	138
Figura 3.31. Curva de temperatura (CAMATT). Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW. Fuente: elaboración propia.....	139

Figura 3.32. Curvas de temperatura del aire. Pos. de los ventiladores. Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW.....	139
Figura 3.33. Curva de opacidad (CAMATT). Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW. Fuente: elaboración propia.....	141
Figura 3.34. Coeficiente de extinción (1/m). Fuente: [33]	144
Figura 3.35. Explicación de gráfico de resultados. Modelo unidimensional de ventilación con trayectorias. Fuente: elaboración propia.	148
Figura 3.36. Esquema. Posicionamiento de incendio: al 55% de la longitud total	149
Figura 3.37. Evacuación de los usuarios con humo a 390 m de la entrada. Opacidad. Túnel sin sistema de ventilación (estado actual).	153
Figura 3.38. Evacuación de los usuarios con humo a 390 m de la entrada. Opacidad. Túnel con sistema de ventilación (dimensionamiento propuesto).	154
Figura 3.39. Opción 1. Ubicación planta fotovoltaica en Centro de conservación. Fuente: elaboración propia a partir de imagen aérea de Google earth.....	157
Figura 3.40. Opción 2. Ubicación planta fotovoltaica anexa a las salas técnicas. Fuente: elaboración propia a partir de imagen aérea de Google earth.....	157
Figura 3.41. Irradiancia diaria media en zona Centro de conservación (boca norte).....	159
Figura 3.42. Irradiancia diaria media en zona boca sur.....	159
Figura 3.43. Vista desde Boca norte. Macizo rocoso que atraviesa el túnel de Erinyà y Centro de conservación a su izquierda. Fuente: Google maps.	160
Figura 3.44. Comparativa Irradiancia en el mes de junio.....	161
Figura 3.45. Comparativa Irradiancia en el mes de julio	161
Figura 3.46. Comparativa Irradiancia en el mes de agosto	162
Figura 3.47. Carretera de acceso a la zona de la instalación. Fuente: elaboración propia	164
Figura 3.48. Simulación de curva diaria de consumo (ejemplo junio). Fuente: elaboración propia.....	169
Figura 3.49. Comparativa datos reales de consumo en 2022 con simulación. Fuente: elaboración propia.....	170
Figura 3.50. Curva diaria de consumo (estado actual). Fuente: elaboración propia	171
Figura 3.51. Zona disponible para ubicar la planta fotovoltaica. Fuente: Google maps ..	172
Figura 3.52. Vista aérea de la zona donde instalar la planta fotovoltaica. Fuente: Google earth	173
Figura 3.53. Módulo fotovoltaico JA SOLAR DEEP BLUE 3.0 (JAM66S30-505/MR).....	175
Figura 3.54. Módulo con tecnología Half-Cell	175
Figura 3.55. Tecnología PERC	176

Figura 3.56. Inclinación (β) y orientación (α)	177
Figura 3.57. Disposición de módulos. Separación mínima entre filas. Fuente: elaboración propia.....	178
Figura 3.58. Distribución de módulos.....	179
Figura 3.59. MPP. Curva Intensidad-tensión-potencia [37]	182
Figura 3.60. Inversor HUAWEI SUN2000-17KTL-M0	184
Figura 3.61. Diagrama de conexión del inversor [38].	185
Figura 3.62. Sala técnica de baja tensión del túnel de Erinyà	186
Figura 3.63. Visor de acceso a datos de climáticos de la NASA	187
Figura 3.64. PVGIS versión 5.2. Datos de irradiancia	188
Figura 3.65. Curvas corriente-tensión del módulo en función de la temperatura [39].....	190
Figura 3.66. Esquema unifilar de la instalación FV	197
Figura 3.67. Curva potencia pico-voltaje en función de la irradiancia [39]	200
Figura 3.68. Configuración de la instalación FV	201
Figura 3.69. Radiación mensual. Fuente: PVGIS.....	214
Figura 3.70. Datos de consumo y producción fotovoltaica (julio)	220
Figura 3.71. Datos de consumo del circuito Permanente y producción fotovoltaica (julio)	220
Figura 3.72. % de Fuente de suministro eléctrico en cada hora en día normal (julio). Fuente: elaboración propia.....	221
Figura 3.73. Simulación PVGIS	222
Figura 3.74. Producción de energía a través de PVGIS	223
Figura 3.75. Simulación en HelioScope	225
Figura 3.76. Producción de energía a través de HelioScope	226
Figura 3.77. Introducción de modelo de módulo en PVSyst	227
Figura 3.78. Producción de energía a través de PVSyst (<i>izq.BD:NASA /dcha.BD:PVGIS</i>) ..	228
Figura 3.79. PVSyst. Performance Ratio (PR).	228
Figura 3.80. Resultados de producción de energía con diferentes herramientas de cálculo. Fuente: elaboración propia	230
Figura 4.1. Producción de la planta fotovoltaica a través del estudio energético. Fuente: elaboración propia.....	235

Índice de tablas

Tabla 2.1. Incendios con más mortalidad en túneles [3]	22
Tabla 2.2. Requerimientos de la DE 2004/54/EC en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia.....	46
Tabla 2.3. Requerimientos del RD 635/2006 en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia.....	47
Tabla 2.4. Clases de túnel. Normativa Bizkaia (DF 135/2006) [16]	49
Tabla 2.5. Requerimientos del D.F. 91/2012 en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia.....	50
Tabla 2.6. Resumen requerimiento del D.F. 91/2012 en relación a la ventilación [17].....	51
Tabla 2.7. Requerimientos del Circular 03/05 en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia.....	52
Tabla 2.8. Clasificación de túnel. Normativa ITT Ayuntamiento de Barcelona [18]	54
Tabla 2.9. Requerimientos de la ITT en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia	54
Tabla 2.10. Tabla resumen requerimiento de la ITT en relación a la ventilación [18].....	54
Tabla 2.11. Requerimientos de la NFPA 502:2020 en relación a la ventilación.[19]	56
Tabla 2.12. Requerimientos de la normativa francesa en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia.....	57
Tabla 2.13. Tipo de ventilación. Tabla 7-5 del Manual [21]	60
Tabla 3.1. Requerimiento del sistema de ventilación de diferentes normativas. Fuente: elaboración propia.....	65
Tabla 3.2. Datos geométricos. Fuente: elaboración propia	66
Tabla 3.3. Valores típicos por defecto para los factores FHP, K y D. Fuente: elaboración propia.....	69
Tabla 3.4. Datos de tráfico. Fuente: elaboración propia.....	69
Tabla 3.5. Niveles límites recomendables. Fuente: elaboración propia a partir de informe de la PIARC [12]	75
Tabla 3.6. Datos históricos de IMD y veh. Pesados (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Mapa de Tráfico del MITMA [22])......	77
Tabla 3.7. Composición de tráfico. Fuente: elaboración propia.	80
Tabla 3.8. Resumen. Datos de tráfico.....	80
Tabla 3.9. Parque automovilístico considerado	81
Tabla 3.10. Factor de tiempo para VL.....	82
Tabla 3.11. Factor de tiempo para VLC	82

Tabla 3.12. Factor de tiempo para VP	82
Tabla 3.13. Emisiones no procedentes de la combustión	83
Tabla 3.14. Valores admisibles de contaminantes	84
Tabla 3.15. Composición del tráfico en función de la velocidad. Fuente: elaboración propia	86
Tabla 3.16. Emisiones en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia	87
Tabla 3.17. Demanda de aire para diluir los contaminantes. Fuente: elaboración propia.	88
Tabla 3.18. Presión ejercida y requerida en condiciones normales de operación. Fuente: elaboración propia.....	90
Tabla 3.19. Velocidad crítica para potencia de incendio 100 MW. Fuente: Elaboración propia.....	93
Tabla 3.20. Algunos incendios experimentales anteriores a 1995 [24]	96
Tabla 3.21. Valores de potencia incendio según tipo de vehículo	98
Tabla 3.22. Características geométricas. Fuente: elaboración propia	100
Tabla 3.23. Características de tráfico. Fuente: elaboración propia	101
Tabla 3.24. Características climatológicas. Fuente: elaboración propia	101
Tabla 3.25. Características de los vehículos. Fuente: elaboración propia	101
Tabla 3.26. Características de los ventiladores. Fuente: elaboración propia a partir de modelo seleccionado de fabricante	102
Tabla 3.27. Consideraciones de cálculo para el sistema de ventilación. Fuente: elaboración propia.....	102
Tabla 3.28. Hoja de cálculo de pérdidas de carga discretizando el túnel en segmentos de 5 metros de longitud. Posición de incendio: 50%·long.túnel. Fuente: elaboración propia.	112
Tabla 3.29. Empuje generado por los ventiladores. Posición de incendio:50% de la longitud del túnel. Fuente: elaboración propia.....	115
Tabla 3.30. Pérdidas a diferentes posiciones de incendio. Fuente: elaboración propia ..	117
Tabla 3.31. Características de los ventiladores analizados. Fuente: elaboración propia a partir del catálogo de fabricante ZITRÓN.....	119
Tabla 3.32. Dimensiones del ventilador. Fuente: elaboración propia a partir del Catálogo del fabricante ZITRÓN.....	120
Tabla 3.33. Posición de los ventiladores. Fuente: elaboración propia.....	121
Tabla 3.34. Resultados de los cálculos para la ventilación (Potencia ventilador:37 kW). Fuente: elaboración propia	123
Tabla 3.35. Resultados de los cálculos para la ventilación (Potencia ventilador:45 kW). Fuente: elaboración propia	124

Tabla 3.36. Resultados de los cálculos para la ventilación (Potencia ventilador:55 kW). Fuente: elaboración propia	125
Tabla 3.37. Secuencia de arranque de ventiladores. Fuente: elaboración propia	133
Tabla 3.38. Régimen de circulación libre. Fuente: elaboración propia.....	149
Tabla 3.39. Vehículo en fase congestión. Fuente: elaboración propia.	150
Tabla 3.40. Irradiancia en boca norte y boca sur del túnel (base de datos: PVGIS)[34] ...	162
Tabla 3.41. Coordenadas zona instalación. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Google earth.....	163
Tabla 3.42. Datos de radiación. Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de herramienta de la NASA	165
Tabla 3.43. Consumos mensuales en el túnel de Erinyà (2022). Fuente: elaboración propia	166
Tabla 3.44. Niveles de alumbrado en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia	167
Tabla 3.45. Potencia instalada de las luminarias. Fuente: elaboración propia.....	167
Tabla 3.46. Potencia por nivel de iluminación. Fuente: elaboración propia	168
Tabla 3.47. Simulación de consumos horarios en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia.....	168
Tabla 3.48. Consumos mensuales a partir de la simulación de consumos horarios. Fuente: elaboración propia.....	169
Tabla 3.49. Comparativa entre los valores obtenidos de consumo en la simulación y los datos reales del año 2022. Fuente: elaboración propia.....	170
Tabla 3.50. Simulación de consumos horarios a partir de los circuitos de alumbrado disponibles en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia.....	172
Tabla 3.51. Características de los módulos fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia ...	174
Tabla 3.52. Inclinación de los módulos	178
Tabla 3.53. Características del inversor.....	185
Tabla 3.54. Resultados: parámetros condiciones reales del módulo.....	192
Tabla 3.55. Nº mínimo y máximo de módulos por string.....	194
Tabla 3.56. Configuración planta fotovoltaica	196
Tabla 3.57. Régimen de operación del inversor	199
Tabla 3.58. Cálculo cableado corriente continua (DC)	205
Tabla 3.59. Cálculo cableado corriente alterna (AC).....	207
Tabla 3.60. Performance Ratio (PR)	211
Tabla 3.61. Factor k. Fuente: www.cleanergysolar.com	212
Tabla 3.62. Radiación solar plano inclinado (30°) diaria. Fuente: elaboración propia.	213

Tabla 3.63. Radiación por hora y mes. Fuente elaboración propia.....	216
Tabla 3.64. Simulación de Producción por hora y mes. Fuente: elaboración propia	217
Tabla 3.65. Estudio energético. Fuente: elaboración propia	218
Tabla 3.66. Estudio energético (julio). Fuente: elaboración propia.....	220
Tabla 3.67. Resultados de producción de energía con diferentes herramientas de cálculo. Fuente: elaboración propia	230
Tabla 4.1. Características más relevantes del sistema de ventilación propuesto.....	234
Tabla 4.2. Características más relevantes de la planta fotovoltaica	236

Índice de ecuaciones

Ecuación 3.1. Intensidad en hora punta (IHP).....	68
Ecuación 3.2. Intensidad de hora punta en la dirección más cargada	68
Ecuación 3.3. Intensidad en los 15 min más cargados de tráfico.....	68
Ecuación 3.4. Tasa de emisión en la sección del túnel.....	84
Ecuación 3.5. Caudal necesario	85
Ecuación 3.6. Velocidad crítica (Kennedy).....	92
Ecuación 3.7. Ecuación de equilibrio: empuje de ventiladores y pérdidas de carga consideradas en el túnel.....	103
Ecuación 3.8. Pérdidas debidas a la fricción con las paredes.....	104
Ecuación 3.9. Pérdidas de cargas singulares	104
Ecuación 3.10. Efecto pistón	105
Ecuación 3.11. Nº de vehículos simultáneamente en el túnel.....	106
Ecuación 3.12. Pérdidas por viento exterior	106
Ecuación 3.13. Pérdidas por efecto chimenea	108
Ecuación 3.14. Pérdidas por bloqueo del incendio	109
Ecuación 3.15. Empuje real aportado por los ventiladores	109
Ecuación 3.16. Presión ejercida por los ventiladores.....	110
Ecuación 3.17. Régimen de circulación libre	145
Ecuación 3.18. Velocidad de crecimiento de la cola de vehículos	146
Ecuación 3.19. Ocupación de los vehículos no implicados en el accidente	146
Ecuación 3.20. Inclinación óptima [36]	177
Ecuación 3.21. Punto de máxima potencia	182

Ecuación 3.22. Temperatura de la celda	188
Ecuación 3.23. Tensión del circuito abierto a temperatura de celda mínima	190
Ecuación 3.24. Tensión en el punto de máxima potencia.....	190
Ecuación 3.25. Intensidad de cortocircuito	191
Ecuación 3.26. Nº máximo de módulos por string	192
Ecuación 3.27. Nº máximo de módulos por string -rango de seguimiento del MPP	193
Ecuación 3.28. Nº mínimo de módulos por string -rango de seguimiento del MPP.....	193
Ecuación 3.29. Nº máximo de strings a disponer	194
Ecuación 3.30. Sección en cable de corriente continua	203
Ecuación 3.31. Sección en cable de corriente continua	207
Ecuación 3.32. Pérdidas por orientación e inclinación	210
Ecuación 3.33. Producción solar anual	214

Glosario de signos, símbolos, unidades, abreviaturas, acrónimos o términos

PIARC: Asociación Mundial de la Carretera. Es una asociación sin fines lucrativos creada en Francia el 29 de abril de 1909, tras el primer Congreso Mundial de la Carretera, celebrado en París el año anterior, con el fin de agrupar a los organismos relacionados con las carreteras en todos los países, tanto del ámbito gubernamental como territorial o local, entidades públicas y privadas, empresas y a cuantos técnicos se interesasen a título individual por las carreteras y vías urbanas.

ATC: Asociación Técnica de Carreteras: Fue constituida en 1971 con un doble objetivo: acoger y suministrar apoyo al Comité Español de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) y constituir un foro de encuentro y colaboración neutral, independiente y objetivo entre la Administración Pública, los profesionales y las empresas para debatir y tratar la problemática de carácter técnico, económico y social de las carreteras

CAMATT: Calcul Monodimensionnel Anisotherme Transitorire en Tunnel.

CETU (Centre d'Études des Tunnels): Centro de Estudio de Túneles del Ministerio de Transportes francés, adscrito directamente a la Dirección General de Infraestructuras, Transportes y Movilidad.

ITT: instrucción técnica de túneles viarios urbanos de la ciudad de Barcelona

MARTE: Metodología de análisis de riesgo en túneles de la Red de Carreteras del Estado.

MMPP: Mercancías Peligrosas.

NFPA: National Fire Protection Association. Es una organización fundada en Estados Unidos en 1896, encargada de crear y mantener las normas y requisitos mínimos para la prevención contra incendio, capacitación, instalación y uso de medios de protección contra incendio, utilizados tanto por bomberos, como por el personal encargado de la seguridad. Sus estándares conocidos como National Fire Codes recomiendan las prácticas seguras desarrolladas por personal experto en el control de incendios.

PVGIS: Photovoltaic Geographical Information System.

SSEE: Servicios de Emergencia Exterior

R.C.E.: Red de Carreteras del Estado

MITMA: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

ONU: Organización de las Naciones Unidas

VSAP: Vapor de Sodio de Alta Presión.

VP: Vehículos pesados

1 Introducción

Los túneles constituyen una infraestructura imprescindible para el funcionamiento de la economía de un país, generando beneficios económicos y sociales, mejorando la comunicación entre zonas salvando dificultades orográficas, traducándose esto en: una reducción del tiempo de desplazamiento; mayor seguridad en la circulación, y el consiguiente ahorro energético.

En los últimos 10-15 años, en España se ha incrementado la inversión en la construcción de túneles de carretera, así como en la mejora y desarrollo de nuevas infraestructuras con unos niveles mayores de seguridad, debido en gran parte a la difícil orografía del país, con una elevada y diversa presencia de macizos y cadenas montañosas.

Incluso, en áreas urbanas, se ha incrementado la construcción de túneles. Ante los retos de movilidad que nos encontramos actualmente en las grandes ciudades, se está potenciando por las administraciones públicas la construcción de soterramientos en vías con alta capacidad de tráfico. Las ventajas son abundantes, destacando, la reducción del impacto ambiental (contaminación procedente de los vehículos y ruido que afecta a edificios residenciales cercanos) y mejora de la conectividad entre barrios separados por dichas vías.

Ahora bien, se remarcan dos puntos en los que se debe hacer hincapié en los túneles de carretera:

- La seguridad
- La eficiencia energética

En cuanto a la seguridad, en los últimos 15-20 años, se ha avanzado sustancialmente en este aspecto, tanto desde las administraciones públicas con publicación de normativas, recomendaciones y legislación encaminada a la mejora de la seguridad en los túneles y por otro lado, por parte de entidades privadas, con el desarrollo de nuevas tecnologías y medidas alineadas con las políticas llevadas a cabo por los Estados, con el objetivo de la reducción del riesgo intrínseco del tránsito por el interior de un túnel de carretera.

No obstante, resulta difícil predecir el comportamiento humano, que pudiera desencadenar en accidentes en túneles, así como su comportamiento ante una incidencia. Los usuarios pueden verse implicados en una situación de riesgo, que, de no ser controlada, podría llegar a tener consecuencias fatales. El mayor riesgo que nos encontramos en los túneles es la ocurrencia de un incendio. La experiencia indica que los incendios en túneles son accidentes de evolución rápida y de graves consecuencias, por las altas temperaturas, la gran cantidad de humos calientes y gases que se producen, siendo por tanto crucial una respuesta rápida por parte de la unidad de primera intervención de emergencia, y un correcto funcionamiento de las instalaciones de protección existentes. Por tanto, se hace esencial la existencia de medidas de seguridad adecuadas para evitarlo o en su defecto combatirlo.

Los datos relativos a la accidentalidad muestran que la circulación por los túneles es más segura que el tránsito por infraestructuras a cielo abierto. Sin embargo, su vulnerabilidad es mucho mayor y las consecuencias de un accidente en un espacio confinado son mucho más graves que si se produjesen al aire libre.[1]

En cuanto al segundo punto mencionado, uno de los principales objetivos de la sociedad es reducir el consumo energético en todo tipo de instalaciones debido al elevado coste económico y los elevados niveles de contaminación asociados.

Cada día hay mayor sensibilidad en la sociedad sobre las condiciones ambientales que se deben preservar en cualquier actuación y de establecer medidas encaminadas a la reducción de consumo de energía y del cambio climático en las distintas actividades diarias. Esto implica una mayor concienciación en relación con el diseño y operación de los túneles de carretera.

Los fabricantes de los diferentes sectores están continuamente invirtiendo en el desarrollo de equipos y sistemas con el objetivo de maximizar el rendimiento y reducción de los consumos energéticos. En los últimos años, las administraciones públicas están intensificando y fomentando políticas de eficiencia energética, a través de diversos planes y legislaciones.

En particular en los túneles de carretera, una vez que se encuentran en servicio, el coste de explotación es elevado, por lo que se hace imprescindible aplicar técnicas y tecnologías que permitan optimizar costes y hacer así más sostenible el mantenimiento de estas infraestructuras. Los equipos vinculados a la iluminación de los túneles representan la mayor influencia en el coste operacional de los túneles, por delante de otros sistemas como la ventilación, las comunicaciones o el control del tráfico.

Salvo en túneles con congestiones frecuentes, donde se deba encender el sistema de ventilación para asegurar unas condiciones ambientales óptimas, el sistema de iluminación es con diferencia el mayor consumidor de energía.

Es por ello, que se deben analizar alternativas y oportunidades de mejora, para obtener una gestión más eficiente.

En multitud de ocasiones, desgraciadamente, solo se analizan los costes de operación una vez que el túnel se pone en servicio. Como bien se explica en el informe de la PIARC: *“Explotación de túneles de carretera: Primeros pasos hacia un enfoque sostenible”* [2], el coste de mantenimiento tiene un gran peso en las decisiones que se toman en la fase de diseño/proyecto. Se presenta el siguiente diagrama la relación entre el coste de mantenimiento y el nivel de influencia sobre estos costes:

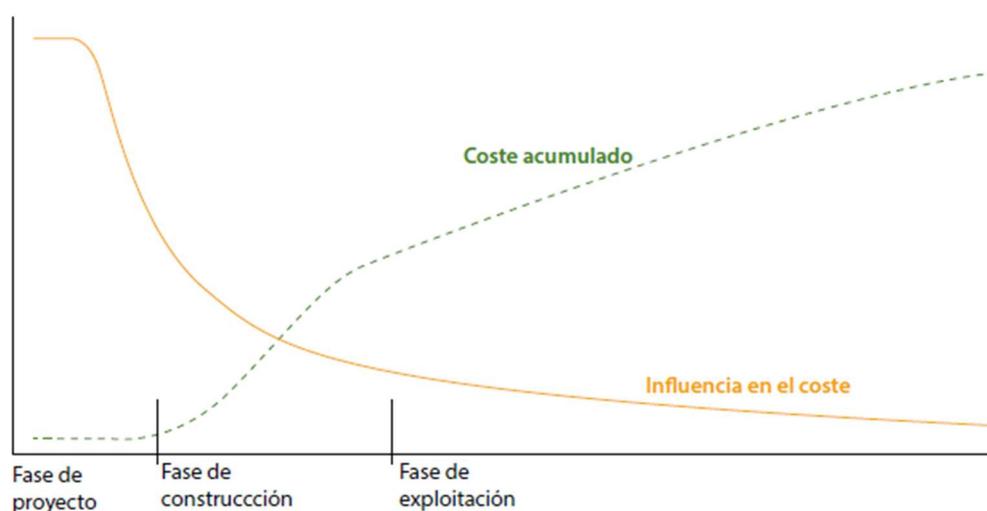


Figura 1.1. Relación entre el coste de mantenimiento y la influencia de las distintas fases. [2]

Ante esto, se debe remarcar la necesidad de tener en cuenta en las fases iniciales, los costes asociados a aquellos sistemas y equipos que se dispondrán en el túnel, considerando el ciclo de vida completo del túnel, y no solo centrándose en la construcción del mismo.

En base a los comentado en esta introducción, tanto en los proyectos de túneles de nueva construcción como de rehabilitación de los existentes, y la necesidad cada vez más apremiante de disponer de unas infraestructuras con mayor seguridad, más cómodas y durables, con menor impacto ambiental y más eficientes desde el punto de vista energético, en el presente TFM, se estudiará la mejora de la seguridad y la eficiencia energética en un túnel de carretera mediante la instalación de un sistema de ventilación y una instalación fotovoltaica.

En un primer lugar, se realiza un análisis de las principales normativas y recomendaciones a nivel nacional e internaciones, en relación con la seguridad y eficiencia energética en túneles de carretera.

Posteriormente, se realiza una introducción y explicación de las principales características del túnel a estudio.

Por último, se llevará a cabo el estudio y diseño del sistema de ventilación y de la planta fotovoltaica de acuerdo con las normativas de aplicación vigentes.

2 Estado del arte

2.1 PROBLEMÁTICA DE LOS TÚNELES

2.1.1 SEGURIDAD

Los túneles de carreteras proporcionan unas ventajas y facilidades de comunicación, que se traducen principalmente, en mejores condiciones de seguridad y comodidad, mejora del tiempo de recorrido y ahorro energético, reduciendo cierto tipo de riesgos viarios.

Pero, en el caso de que se produzca un incidente en su interior, también conllevan un mayor riesgo para los usuarios respecto al resto de la carretera a cielo abierto. El incidente más peligroso que puede ocurrir en un túnel es la aparición de un incendio.

Los incendios en túneles son sucesos de baja ocurrencia, pero con graves consecuencias. A continuación, en la Tabla 2.1, se presentan los incendios con mayor mortalidad en los últimos 30 años:

Tabla 2.1. Incendios con más mortalidad en túneles [3]

Fecha	Túnel (Longitud)	Ubicación	Evento/Circunstancia	Consecuencias-personas
12/10/2007	Newhall Pass. Interestatal 5 Los Ángeles (167 m)	California (EEUU)	Incendio de camión con 38 m ³ combustible tras choque por pinchazo	3 muertos. 10 heridos
23/03/2007	Melbourne Burnley (3.400 m)	Melbourne (Australia)	Colisión múltiple entre 3 camiones y 4 coches. Derivó en una explosión 1000°C	3 muertos
24/11/2001	San Gotardo (16.918 m)	A2 (Suiza)	Fuego derivado del choque entre dos camiones	11 muertos 19 heridos
06/08/2001	Gleinalm (8.320 m)	A9 cerca de Graz (Austria)	Colisión entre dos coches	5 muertos 4 heridos
29/05/1999	Tauern (6.401 m)	A10 Salzburgo-Spittal (Austria)	Accidente de vehículos. 14 horas, 1200 °C	12 muertos 49 heridos

Fecha	Túnel (Longitud)	Ubicación	Evento/Circunstancia	Consecuencias-personas
24/03/1999	Mont Blanc (11.600 m)	Francia-Italia	Incendio en camión. 53 horas, 1000°C	39 muertos. Múltiples heridos
18/03/1996	Isola delle Femmine. Palermo (148 m)	Palermo (Italia)	Choque entre minibús y camión cisterna	5 muertos 26 heridos
10/04/1995	Pfander (6.719 m)	Austria	Colisión entre 1 camión 2 coches y 1 minibús	3 muertos 4 heridos
27/02/1994	Huguenot (3.914 m)	Sudáfrica	Incendio en autobús con 45 pasajeros	1 muerto 28 heridos

El incendio ocurrido en el túnel de Nihonzaka (Mashimo y Mizutani, 1979) destruyó 173 vehículos, con una duración de extinción de más de 11 días. Fue, por lo tanto, uno de los primeros incendios importante ocurrido en los túneles de carretera.

A partir de dicha catástrofe, en Japón, construyeron un túnel experimental para ensayos de incendios, y establecieron, por primera vez, los principios básicos de la circulación del humo en un túnel. En Europa, al incendio del túnel de Nihonzaka, no se le dio la importancia que requería, pensando que un desastre de tal magnitud no podía ocurrir en la Europa de finales del siglo XX.

No obstante, años después, se produjeron varios incendios con catastróficas consecuencias en túneles de gran longitud: en abril de 1999 se produjo el incendio de un camión en el túnel del MontBlanc (Francia-Italia), que transportaba margarina y harina, donde murieron 39 personas. El incendio duró 53 horas (prácticamente se extinguió solo), alcanzándose temperaturas de hasta 1.000°C, ardiendo en algunos puntos los 10 cm de mezcla bituminosa en caliente del firme y produciéndose daños en la calzada en 1,2 km. El túnel se mantuvo cerrado al tráfico durante tres años por problemas jurídicos y administrativos, llevándose a cabo una remodelación completa del mismo. En mayo de ese mismo año, en el túnel del Tauern (Austria) se produjo un incendio debido a un choque múltiple de dos camiones y tres coches. Los bomberos tardaron en apagar el fuego 15 horas, y se alcanzaron temperaturas de hasta 1.200°C. La reconstrucción del tramo dañado duró tres meses. Murieron 12 personas.

La conmoción causada en Europa por estos accidentes fue enorme. Y para ampliarlo, en octubre de 2001, un choque frontal entre dos camiones generó un incendio en el túnel de San Gotardo (Suiza) con 11 muertos, provocado por un chofer en estado de ebriedad. La mayor parte de las víctimas del túnel fallecieron asfixiadas por el humo producido por las gomas de los neumáticos.



Figura 2.1. Incendio en el túnel de San Gotardo (Suiza) el 24/10/2001 [4]

A pesar de lo que pueda parecer, la ocurrencia de estos grandes incendios no supuso un fuerte impacto en los conceptos adquiridos en cuanto a la ventilación como herramienta de control de humos, ya que buena parte del conocimiento fundamental y los principios de ventilación habían sido ya adquiridos. Sin embargo, estos incidentes mostraron que la ocurrencia de incendios de gran magnitud parecía más frecuentes de lo esperado y, sobre todo, que no estaban asociados al paso de mercancías catalogadas como peligrosas. El resultado principal fue la identificación de la importancia de plantear la seguridad frente a incendio de forma global siendo clave la identificación de la necesaria integración de todos los elementos que intervienen (operación, usuarios, vehículos e infraestructura).

Estos principios se reflejaron en la revisión sustancial de las normativas nacionales e internacionales de distintos países, siendo el exponente principal en Europa la publicación de la Directiva Europea Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras. En 2006, en España se realizó la transposición de la citada Directiva incrementando los requisitos exigidos y extendiéndola no sólo a los túneles de la Red

Transeuropeas sino a los túneles de la Red de Carreteras del Estado, mediante el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

Tras una breve descripción de diferentes sucesos ocurridos en túneles con consecuencias devastadoras, se puede concluir que el principal problema de seguridad que nos encontramos en los túneles es la existencia de un incendio en su interior. Los túneles, al ser cavidades muy aisladas del exterior presentan el problema de la dificultad de la eliminación del calor, el humo y las sobrepresiones, que se pueden llegar a generar durante un incendio. Al margen de esto, existen ciertas conductas, que no ayudan precisamente a reducir el número de víctimas. A continuación, se describen algunos de estos problemas [5]:

- Efecto horno. La concentración del humo y calor que se produce en el interior de un túnel es debida a que no existe hueco alguno por donde pueda salir el humo y el calor de una forma inmediata y natural. Esto genera el denominado "efecto horno", que consiste en acumulación progresiva del calor, que se traduce en un aumento continuado de la temperatura.
- Alta radiación: Las altas temperaturas dentro de un túnel, producto del efecto horno generan grandes flujos de calor por radiación. El ser humano no puede soportar temperaturas del aire del orden de 80°C, ni radiación de calor mayor de 2,5 kW/m², incluso los bomberos bien equipados con equipos ignífugos no pueden trabajar con radiaciones superiores a 5 kW/m², lo que les impide, en muchos casos, acercarse a un fuego bien desarrollado para combatirlo.
- Efecto cañón. Este efecto se presenta, cuando se produzcan explosiones debidas, por ejemplo, a un incendio. Imaginemos un camión-cisterna, que contiene un gas presurizado, que por efecto del calor del incendio explota, debido al aumento de la presión de vapor del gas que transporta. No es difícil imaginar que, existiendo solo una cavidad lineal, ésta, se comportará como si fuera el cañón de una escopeta. Ello es debido, a que la sobrepresión generada por la explosión en el interior del túnel solo puede liberarse hacia ambos lados a partir del punto de origen de dicha explosión. Si tal explosión se produce, la sobrepresión creada, será mayor que si nos

encontráramos a cielo abierto, con lo cual, los daños para las personas, debidos a la onda expansiva, serán mayores que en un lugar a cielo abierto. También los objetos proyectados por la explosión se concentrarán, debido a que serán direccionados a través del túnel.

- Mayor concentración de tóxicos: En los incendios en túneles se produce la combustión de distintos tipos de materiales, como son los combustibles y lubricantes de los vehículos, y sus componentes plásticos y textiles, además de la propia carga que lleven, si se trata de vehículos industriales.

Se produce una gran cantidad de CO por la combustión incompleta producida al estar limitado el aporte de oxígeno, así como una serie de gases tóxicos derivados de la composición de los materiales que se queman, especialmente los plásticos y los tejidos sintéticos, siendo los principales los ácidos cianhídricos (HCN), el clorhídrico (HCL), y el fluorhídrico (HF).

- Vías de escape reducidas. Por lo general, las vías de escape en un túnel son bastante reducidas, por lo que bastan sólo algunas condiciones para un desenlace catastrófico.
- Desorientación de los usuarios. Otro problema muy importante, es la desorientación que se produce en las personas cuando pierden la visión, debido a la acumulación del humo producido durante un incendio. Esta desorientación ocasionará, que no sepan hacia donde caminan o conducen, pudiendo generar nuevos accidentes. Es importante remarcar lo rápido que se desarrolla un incendio en un túnel, por lo que el tiempo disponible para su evacuación es muy reducido. Casos reales, demuestran que, el tiempo disponible para la evacuación oscila entre un mínimo de 5-6 minutos y un máximo de 10-12 minutos, dependiendo de las instalaciones disponibles y características constructivas de cada túnel y de la magnitud del incendio. Por lo tanto, salvo en el caso de que el túnel cuente con una unidad de intervención propia, los usuarios en el interior del túnel deben realizar la autoevacuación sin ayuda del exterior.
- Comportamiento ingenuo de los usuarios. Este comportamiento es muy grave, pues ha sido motivo de varias muertes en incendios recientes. Hablamos de

comportamiento ingenuo, cuando un usuario que está viendo fuego en un vehículo, se detiene e incluso se baja de su vehículo para contemplar mejor la escena, debido a la curiosidad que suscita lo inhabitual. No estamos hablando de personas que cogen un extintor para intentar tratar de apagar el fuego, sino de personas “espectadoras”. Estas personas se ponen así mismas en grave peligro, por el hecho de permanecer en el interior del túnel y, además bloquean el paso a los vehículos que vienen detrás, con lo cual, también ponen en peligro a los demás usuarios. Los usuarios, lo que deberían hacer, es evacuar inmediatamente el túnel incendiado.

La ingeniería especializada en túneles es consciente de este hecho y, por ello, se sigue desarrollando herramientas de análisis, y trabajando en establecer criterios en proyecto y técnicas de respuesta, con el fin de alcanzar y mejorar la seguridad. Es cierto, no obstante, que los problemas teóricos y prácticos que plantea el estudio experimental y la modelación de incendios en túneles son importantes y conviene tener presente cuales son las posibilidades y limitaciones de las herramientas de que se dispone.

2.1.2 EFICIENCIA ENERGÉTICA

Otro punto de vital importancia en los túneles de carretera es la mejora de la eficiencia energética y la incorporación de aspectos de sostenibilidad en todas las fases (diseño, construcción y explotación).

El coste de explotación de los túneles de carretera es elevado, por lo que se hace imprescindible aplicar técnicas y tecnologías que permitan optimizar costes y hacer así más sostenible el mantenimiento de estas infraestructuras.

Entre las líneas estratégicas de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) compuesta por Comités especializados en diferentes materias, como el Comité técnico de túneles de carretera, se encuentra el desarrollo y difusión de conocimiento que permita mejorar la seguridad, así como la mejora de la eficiencia en las labores de explotación o incluso en la mitigación de impacto al medio ambiente.

En los últimos años, se ha podido visualizar la importancia que ha dado el Comité técnico de túneles a la sostenibilidad y la eficiencia energética con la publicación de diferentes informes, tales como:

- Manual de Túneles de Carretera: mantener y divulgar información vigente relativa a la explotación sostenible de túneles de carretera. [6]
- Explotación sostenible de túneles de carretera: mantener y divulgar información actual relativa a la explotación sostenible del sistema de túneles y equipos que incluya equipos de seguridad contra incendios, iluminación y ventilación.[7]
- Seguridad integral en túneles de carretera: mantener y divulgar información actual relativa al diseño de túneles para una explotación eficaz, eficiente y segura. [8]
- Grandes infraestructuras subterráneas e interconectadas: Mantener y divulgar información actual relativa a la optimización de las estrategias de operación y seguridad para grandes infraestructuras subterráneas e interconectadas.[9]

La aprobación por la Asamblea General de la ONU en el año 2015 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la correspondiente Agenda 2030, hace necesario impulsar la implementación de los objetivos en todos los ámbitos, incluidos los túneles.

Los ODS se vienen considerando en el desarrollo de numerosos proyectos de túneles. Los planteamientos suelen pasar por contemplar el impacto sobre el consumo energético, aspecto que, por motivaciones puramente económicas, ya forma parte de los objetivos a tener en cuenta en el diseño de los diferentes sistemas instalados en los túneles.



Figura 2.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Fuente: web oficial de la ONU

Recientemente, en la 2ª Conferencia Internacional sobre Túneles y el VIII Simposio Nacional de Túneles celebrado en octubre de 2022 en Granada, se hizo reiteradas menciones a este punto y se instó a que: *“en los futuros proyectos de túneles así como para la explotación de los mismos, incluso para los ya existentes, habrá que tener en cuenta los siguientes parámetros: transición ecológica, digitalización e integración, mejora de la funcionalidad, resiliencia y mejora de la disponibilidad, sostenibilidad, nuevas energías de propulsión, vehículos conectados y nuevas tecnologías, formando parte todo ello de una Estrategia de Movilidad segura, sostenible y conectada.”*

A nivel nacional, el Gobierno de España ha lanzado recientemente un plan de inversiones de manera prioritaria, para la mejora en la gestión, seguridad y eficiencia de la red de túneles, a petición de la Comisión Europea. Esta petición responde a la exigencia europea de aplicar unos requisitos mínimos de seguridad en estas infraestructuras críticas (sólo en la red de carreteras del Estado hay un total de 354 túneles).

En la celebración de la Conferencia anteriormente indicada, el Jefe de Servicio de la Subdirección General de Conservación del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) del Gobierno de España, anunció que en línea con los ODS y concretamente con el objetivo 9. Industria, innovación e infraestructura, se está desarrollando por parte de la Dirección General de Carreteras un Plan para dotar a los

túneles de la R.C.E. de un sistema de iluminación resiliente, un sistema de iluminación que mediante una gestión digital e inteligente permita adaptar la iluminación a las diferentes situaciones con gran eficiencia. A parte, se indicó la iniciativa de instalación de huertos solares que provoquen la autosuficiencia del alumbrado de los túneles. El objetivo es que, en 2028, cuando terminen las actuaciones, la red viaria, que suma 26.400 kilómetros y que supone un gasto de 30 millones de euros en energía, ahorre en un 50% su consumo eléctrico.

Todas estas iniciativas y medidas ya tomadas se deben, en gran parte, al alto consumo energético permanente que sufre un túnel de carretera.

Durante los últimos años, se han enfocado todos los esfuerzos en reducir el consumo energético llevando a cabo diferentes actuaciones en las instalaciones de alumbrado. Entre estas se destacan:

- Sustitución del alumbrado compuesto generalmente por luminarias de VSAP por tecnología LED. En los últimos años, esta tecnología ha experimentado grandes avances, ofreciendo fiabilidad y rendimientos superiores al VSAP.
- Selección de la luminaria óptima (aprovechamiento del haz de luz en las zonas requeridas), y su distribución y posicionamiento idóneo (altura, interdistancia y orientación).
- Incremento de la reflectancia de las superficies del túnel (pavimentos claros o coloreados, hastiales pintados o con paneles reflectantes).
- Reducción de los niveles lumínicos en las bocas de acceso, mediante la instalación de bóvedas de transición lumínica para el aprovechamiento de la luz solar, parasoles, atenuadores de la luz...
- Apagado de la iluminación del interior del túnel mediante sensores de presencia que conecte y desconecte el alumbrado en función del paso de vehículos. Esta actuación está en fase de estudio en diferentes túneles. Esta solución puede generar grandes ahorros en túneles con condiciones de poco tráfico en horario nocturno.

Pero, hoy en día, hay otras alternativas para la mejora de la eficiencia energética, y conseguir ahorros de consumo en los túneles de carretera, como es en el ámbito de la generación de la energía eléctrica a través de energías renovables, por ejemplo:

- Instalación de módulos fotovoltaicos en las bocas de los túneles.
- Generación de energía eólica en bocas o en corrientes de aire en el túnel.
- Sistemas de almacenamiento y aprovechamiento de energía disponible (como puede ser mediante el movimiento de agua entre bocas a distintas cotas).
- Carga de vehículos eléctricos en inmediación del túnel aprovechando la instalación eléctrica dispuesta.
- Aprovechamiento de la inercia térmica del túnel para climatización de edificios cercanos.

Actualmente, prácticamente ninguno de los túneles de la R.C.E., dispone de suministro, ya sea principal, alternativo o complementario, a través de energías renovables, por lo que ante la crisis energética mundial actual, con las crecientes limitaciones de la capacidad de los recursos energéticos, hacen que sea imperativo reducir el uso de combustibles fósiles. Por lo tanto, el atractivo objetivo que nos deberíamos marcar es llegar a una etapa en la que la infraestructura vial sea neutra desde el punto de vista energético o incluso se convierta en un exportador neto de energía.

En el informe *“Carreteras de energía positiva”* [10], desarrollado por la PIARC en el año 2019, se contemplan diferentes tecnologías para la generación de energía renovable en las infraestructuras, como las carreteras. En referencia a la energía solar, se mencionan diferentes opciones de instalación de módulos fotovoltaicos, tales como:

- Instalado en la superficie de la carretera (paneles solares incrustados en la superficie).
- Matrices solares integradas en otras estructuras, como barreras acústicas, edificios o cubiertas de túneles.
- Paneles solares instalados en otro lugar de la propiedad de la Administración de Carreteras.

- Pequeñas instalaciones de unos pocos paneles que alimentan columnas de alumbrado, señales o equipos de control en carretera.

En línea con lo indicado, en el presente TFM, se estudiará la instalación de módulos fotovoltaicos en un túnel de carretera como suministro complementario de energía al túnel.

2.2 VENTILACIÓN EN TÚNELES DE CARRETERA

2.2.1 GENERALIDADES

La ventilación en los túneles es necesaria tanto para su explotación normal, como en situaciones de emergencia. En condiciones de explotación normal, su finalidad es garantizar en el interior del túnel una atmósfera limpia, respirable, no tóxica y, en condiciones ambientales óptimas. En situación de emergencia se requiere la ventilación para adecuar el flujo del humo y de los productos de combustión, con el objeto de crear un entorno más seguro que permita la evacuación de los usuarios y la intervención de los servicios de emergencia.

En condiciones de explotación normal la ventilación natural puede ser suficiente cuando el flujo de aire generado por la circulación de los vehículos o por las condiciones meteorológicas diferentes en las bocas del túnel proporcionan una ventilación suficiente para mantener una calidad aceptable del aire.

La cantidad y composición de humos varían sensiblemente en función de diversos factores que determinan si las exigencias normales de ventilación pueden ser alcanzadas por medios naturales o si se requiere ventilación mecánica, tales como:

- Longitud del túnel
- Pendiente (en el túnel y en los accesos).
- Altura o nivel sobre el mar.
- Composición del tráfico.
- Fluidez del tráfico.
- Si es unidireccional o bidireccional.

Estos factores determinan igualmente las exigencias aplicables a la ventilación mecánica en situación de emergencia y en particular los riesgos originados por un incendio. En puntos posteriores se analizará de manera exhaustiva los condicionantes a tener en cuenta en el dimensionamiento de un sistema de ventilación.

2.2.2 COMPORTAMIENTO DEL HUMO

Cuando se inicia un incendio, la temperatura se va incrementando paulatinamente, aumentando la cantidad de gases generados, los cuales por efecto de la flotabilidad se elevan a la parte superior de la sección del túnel. Si el incendio se produjese al aire libre, el calor generado por el incendio se disiparía. Sin embargo, cuando el incendio se produce en recintos cerrados, los gases acumulados en las proximidades del combustible, con una temperatura elevada, emiten energía por radiación la cual contribuye a gasificar el combustible existente incrementando la temperatura del foco. Este proceso de realimentación del incendio por radiación lleva a un incremento muy importante de la temperatura en las proximidades del foco denominado llamarada (flash-over).

Sin embargo, la existencia de corrientes forzadas hace que modifiquen las condiciones típicas de los recintos cerrados. Así, la Figura 2.3 muestra esta situación del penacho arrastrando aire vecino, así como la interferencia con un viento lateral provocado por la ventilación natural o artificial y con una superficie de cierre del espacio superior que impide el desarrollo vertical de la llama y el penacho; y provoca la formación de un estrato de humo con el techo que se extiende en horizontal hasta que se enfría y se mezcla con la capa de aire limpio.

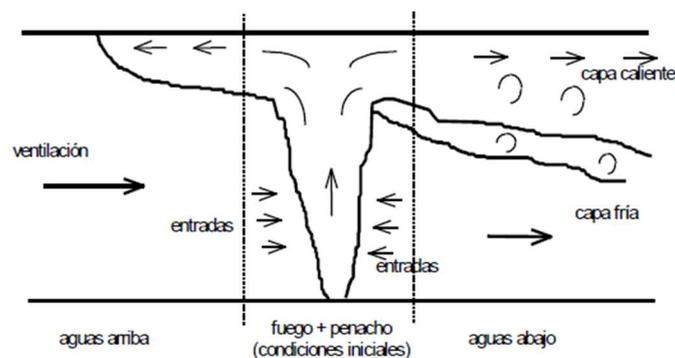


Figura 2.3. Esquema desarrollo del incendio en túneles

En la Figura 2.3 se bosqueja también el retroceso aguas arriba de la capa de humos (a veces llamado recirculación o, en inglés, backlayering) que intenta ser evitado en los túneles de un solo sentido de circulación mediante aumento de la velocidad de soplado. El foco se alimenta por su parte inferior, con corrientes de aire.

En función de las condiciones de la corriente de aire longitudinal existente en el túnel la distribución de la nube de humos se producirá en mayor o menor medida aguas arriba del foco produciendo el retorno (backlayering) de la capa caliente de humos.

Así, cuando la velocidad del aire en el túnel es reducida, el movimiento del humo se produce a ambos lados, pero en condiciones de estratificación hasta que, debido al enfriamiento por su contacto con las paredes y tras alejarse del foco, comienza a destruirse la capa situada en la altura del túnel (Figura 2.4):

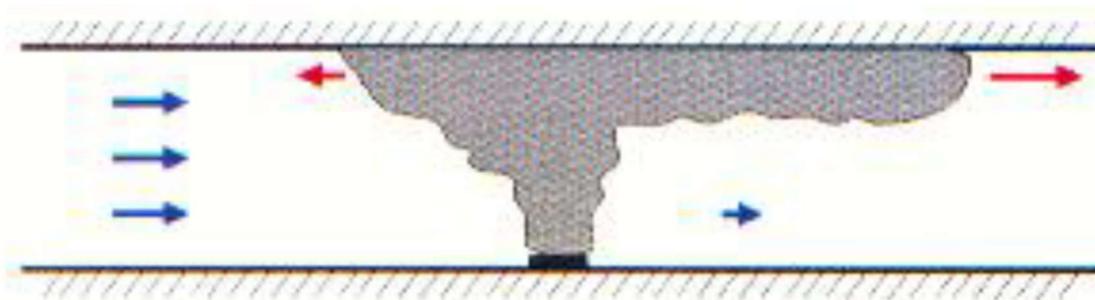


Figura 2.4. Velocidad reducida

Sin embargo, cuando la velocidad es algo más elevada el proceso de desestratificación se incrementa aguas abajo del foco y aguas arriba se mantiene un cierto retroceso de la capa de humos (Figura 2.5):

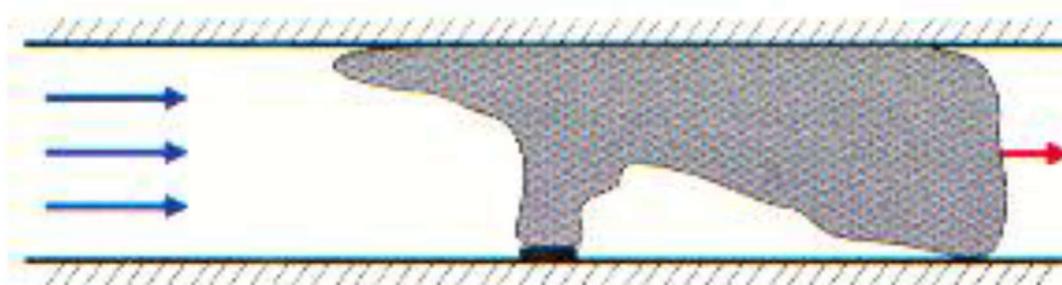


Figura 2.5. Velocidad más elevada.

Existe un determinado valor de velocidad longitudinal que produce la desaparición o reducción casi completa del retroceso de los humos, si bien la situación de desestratificación aguas abajo es muy importante. El valor de velocidad que produce este efecto se conoce con el nombre de velocidad crítica.

2.2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN

2.2.3.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha adelantado anteriormente, la ventilación de los túneles puede realizarse tanto por medios naturales como por sistemas forzados. La ventilación natural consiste en el movimiento del aire generado por el efecto pistón creado por el movimiento de los vehículos, debido a la diferencia de presión existente entre ambas bocas, ocasionada por la diferencia de temperatura en las bocas y por la diferencia de cota, y debido al viento exterior. Los sistemas de ventilación artificial se basan en ventiladores para producir una corriente de aire, y pueden utilizar conductos y trampillas para distribuirla. A la hora del diseño, independientemente de los equipos de ventilación mecánica proyectados, se deberá de tener siempre en presente la existencia, con mayor o menor intensidad, de las corrientes de aire naturales mencionadas [11].

Los sistemas de ventilación se pueden clasificar en función de la dirección del flujo de aire respecto a la dirección del tráfico, siendo longitudinal, si la dirección de la ventilación sigue el eje del túnel, y transversal, si resulta de forma perpendicular.

La ventilación de los túneles se basa en la aplicación de uno de los dos siguientes principios:

- Dilución del aire contaminado/humos, o
- Captura y extracción del aire contaminado/humos.

En situación de tráfico normal, se emplean estrategias basadas en la dilución del aire contaminado, donde se busca mantener la calidad del aire y de la visibilidad por encima de un valor límite.

El informe de la PIARC sobre *“Túneles de Carretera: Emisiones de vehículos y demanda de aire para ventilación”* [12], presenta las tasas de emisión actualizadas para el año 2018 y factores de corrección para obtener las predicciones de las emisiones hasta el año 2035. También se aporta el procedimiento para calcular las necesidades de aire exterior para el diseño de la ventilación de túneles de carretera.

En cambio, en situación de emergencia, la gestión del humo se consigue perfectamente mediante la renovación del aire, por ejemplo, mediante la extracción del aire y de los humos. Sin embargo, la dilución puede incrementar la sostenibilidad, por ejemplo, mediante la reducción de la concentración de gases tóxicos. De esta forma el aire viciado se reemplaza por aire limpio o libre de humo, que puede introducirse en el túnel utilizando la ventilación forzada o a través de las bocas.

2.2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN

2.2.3.2.1 VENTILACIÓN LONGITUDINAL

Los sistemas longitudinales impulsan el aire a lo largo del eje del túnel. El aire puede ser introducido o extraído a través de un número limitado de puntos, tales como las bocas o los pozos de ventilación.

El tipo de ventilación longitudinal más utilizado es el que se basa en ventiladores (jet fans) ubicados en la clave o hastiales del túnel (por falta de gálibo) con el fin de impulsar el flujo de aire a través del mismo.

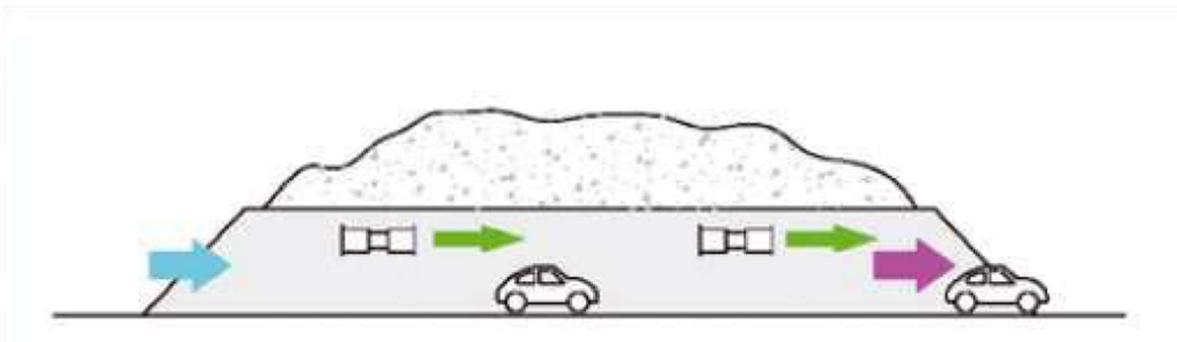


Figura 2.6. Ventilación longitudinal con ventiladores (jet fans) [13]



Figura 2.7. Jet fans instalados en parejas en el túnel de Vielha (Alfons XIII). Fuente: elaboración propia.

Una variedad del sistema de ventilación longitudinal tradicional indicado anteriormente, es el que impulsa el aire a través de un pozo de ventilación. Tiene la particularidad de que sólo posee uno o dos ventiladores o toberas, denominadas Saccardo, que son instaladas de un modo concreto (Figura 2.8). Exactamente como se ha indicado, el objetivo es impulsar el aire en un único sentido, obteniendo el aire del exterior a través de una tobera dotada de un ventilador de grandes dimensiones, posicionado encima de la boca del túnel. Este aire succionado, se inyecta en el interior del túnel por la parte superior de este, a través de una rampa que forma con el túnel un ángulo de unos 15 a 20 grados. El aire, tras recorrer todo el túnel, es expulsado al exterior a través de otra tobera exactamente igual, o simplemente por la boca del túnel si solo tuviera un pozo de ventilación. Estos ventiladores son reversibles, permitiendo invertir el sentido del flujo de aire. Actualmente, este tipo de sistema no se proyecta.

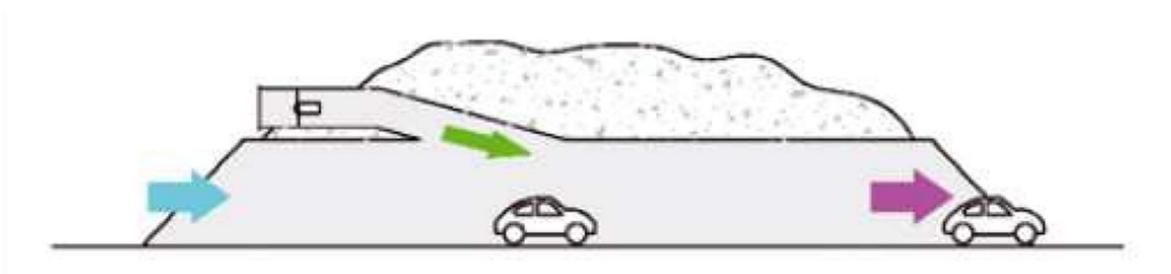


Figura 2.8. Ventilación longitudinal con inyector tipo Saccardo [13]

Hay otra alternativa en la utilización de sistemas de ventilación longitudinales, que es combinándolo con una extracción por el techo a través pozos intermedios.

Los ventiladores impulsan el aire limpio desde las dos bocas del túnel en sentido opuesto, hacia la zona central, donde se sitúa el pozo de extracción, que comunica con la superficie. La extracción se consigue con un ventilador de grandes dimensiones colocado en el pozo que impulsa el aire viciado hacia la superficie.

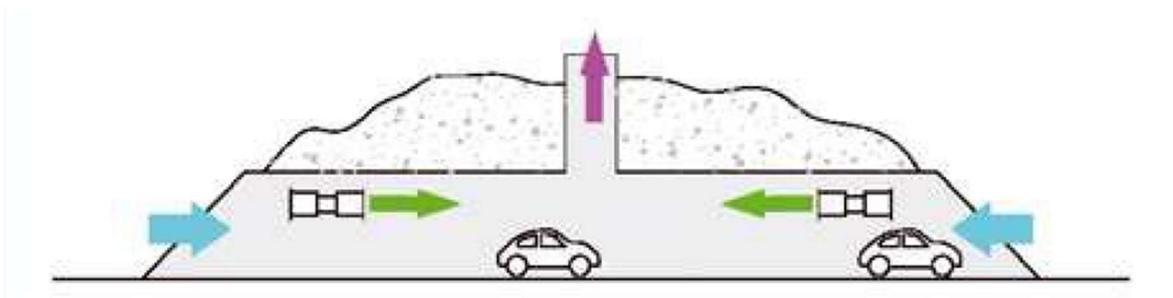


Figura 2.9. Sistema de extracción masiva por un punto [13]

En los túneles unidireccionales sin previsión de congestión, los vehículos situados aguas abajo del incendio, disponen de suficiente tiempo para abandonar el túnel, mientras que, si el túnel es bidireccional o el tráfico está congestionado, la estrategias de ventilación se complica, ya que a ambos lados del incendio se dispone de vehículos.

Por este motivo, prácticamente todos los países contemplan en su reglamentación la limitación del uso de la ventilación longitudinal para túneles bidireccionales largos. En el siguiente punto del presente TFM, analizaremos las prescripciones de las principales normativas nacionales e internaciones sobre el sistema de ventilación. Como adelanto, en Francia se limita a túneles no urbanos de hasta 800 m disponer de ventilación longitudinal, aunque se admiten hasta 1.000 m si el tráfico es inferior a 1.000 vehículos por carril y día. En Colombia, se permite en túneles de hasta 1.500 m disponer de sistema de ventilación longitudinal. En España, el R.D. 635/2006 sólo lo autoriza para túneles con tráfico unidireccional y no congestionado, aunque admite la posibilidad de aplicarla en otros casos si se toman medidas de seguridad complementarias y se justifica con un estudio de ventilación y/o análisis de riesgos.

2.2.3.2.2 VENTILACIÓN SEMITRANSVERSAL

En los sistemas de ventilación semitransversal, el aire es impulsado desde el exterior o extraído de manera distribuida a lo largo de toda la longitud del túnel, normalmente, en la clave y separado del propio túnel por un falso techo conectado con las estaciones de ventilación.

Los puntos de inyección o extracción, suelen ser rejillas o compuertas telecomandas (Figura 2.10), colocadas cada cierta distancia a lo largo de todo el túnel.

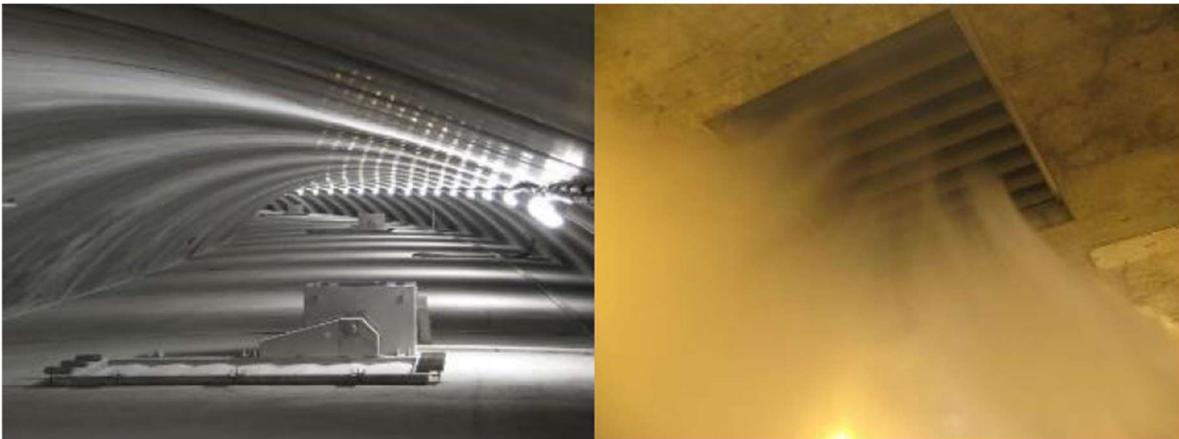


Figura 2.10. Conducto de ventilación en la parte superior de un túnel con rejillas de ventilación [14]

Para poder conseguir esta estrategia, se requiere de potentes ventiladores que sean capaces de suministrar o extraer el caudal de aire limpio necesario, a través del colector que alimenta el conducto de ventilación donde se instalan las rejillas de inyección.

La estrategia más adecuada en este tipo de sistema en caso de incendio es abrir las trampillas próximas al foco del incendio en modo extracción, cerrando el resto. De esta forma, se incrementa la eficacia de la extracción, controlando la velocidad longitudinal del aire desde el comienzo del incendio mediante ventiladores de chorro.

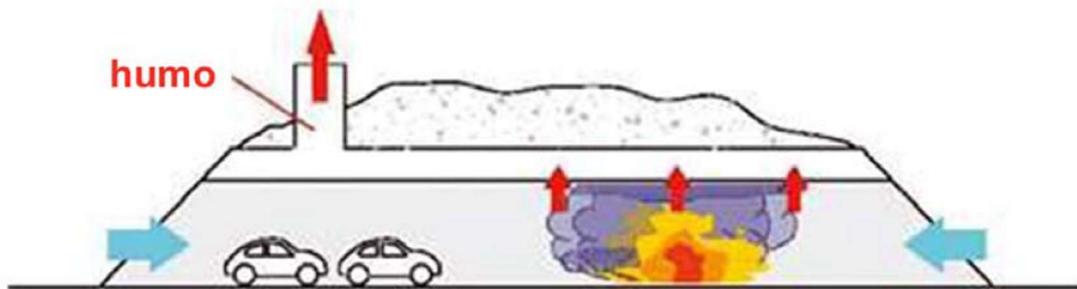


Figura 2.11. Ventilación semitransversal con trampillas exutorias operadas remotamente [13]

2.2.3.2.3 VENTILACIÓN TRANSVERSAL

Los sistemas transversales utilizan conductos para el aire fresco y otros de extracción para el aire viciado. De esta manera se puede distribuir uniformemente el aire inyectado en el túnel, como el extraído. Normalmente, el aire se inyecta por la parte inferior, cerca de la calzada, pero en muchas otras ocasiones se inyecta directamente desde la parte superior.

La extracción se realiza a lo largo del falso techo del túnel, suponiendo un punto favorable de seguridad a la hora de extraer el humo en caso de incendio, al independizarlo de la zona de circulación de vehículos.

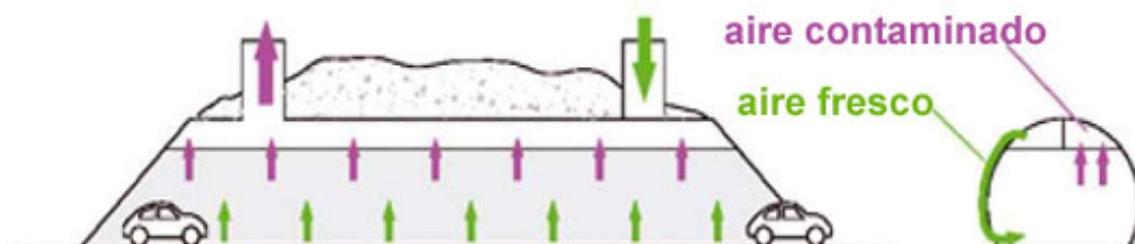


Figura 2.12. Sistema de ventilación transversal con suministro y extracción de aire uniforme [13]

Como se ha explicado anteriormente para el sistema de ventilación semitransversal, se dispone de rejillas/trampillas a lo largo de todo el túnel, controladas remotamente, que permiten la extracción puntual del humo. Para el control de la velocidad y sentido del aire, se utilizan ventiladores ubicados en la clave del túnel, o mediante el empleo de la

ventilación de los cantones adyacentes (en túneles de larga longitud con más de un cantón). Se consigue establecer una corriente de aire en la dirección necesaria mediante la utilización de diferentes regímenes de presión. En este último caso, es imprescindible llevar a cabo un análisis exhaustivo de las condiciones externas existentes en las bocas, que produzcan una diferencia de presión que haga que la inyección de aire fresco o la extracción pueda ser no suficiente.

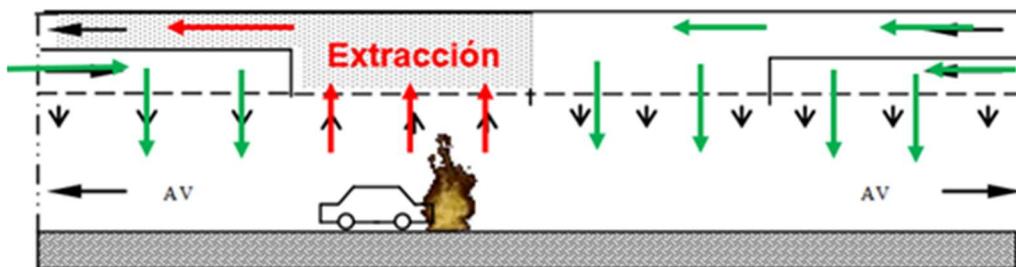


Figura 2.13. Ventilación transversal con trampillas exutorias operadas remotamente
Fuente: elaboración propia.

A modo resumen y simplificando, se presentan en la siguiente imagen los tres tipos generales de ventilación explicados:

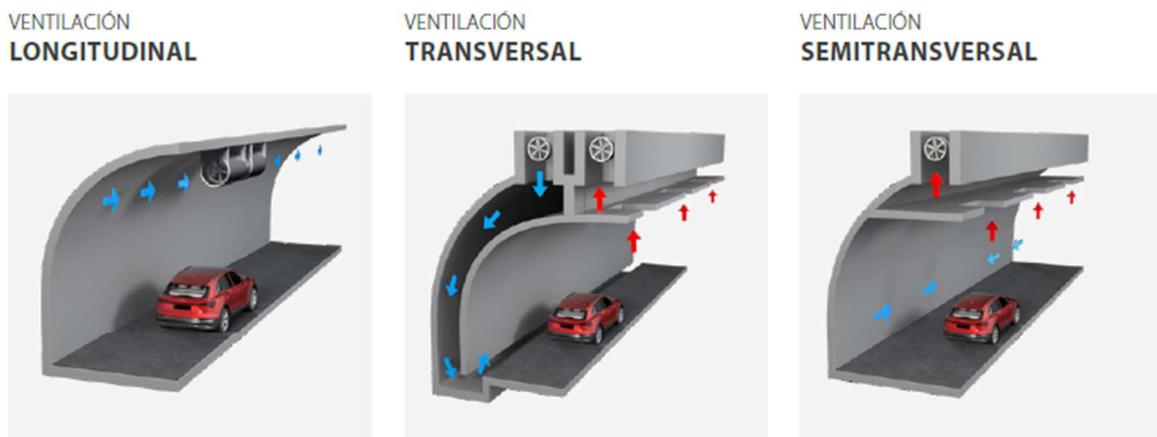


Figura 2.14. Tipos de sistemas de ventilación [15]

2.2.3.3 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN EN SITUACIÓN DE EMERGENCIA

A diferencia con el modo normal de explotación, en el que las condiciones en el túnel evolucionan de forma bastante lenta, éstas pueden cambiar rápidamente en el caso de un incendio dando lugar a un deterioro de la situación en el túnel.

El objetivo del sistema de ventilación en caso de incendio es mantener a los usuarios del túnel en la zona de aire fresco el mayor tiempo posible.

Según la definición de la PIARC, el sistema de ventilación tiene los siguientes objetivos:

- Salvar vidas facilitando la evacuación de las personas.
- Facilitar la operación de rescate y extinción.
- Evitar el riesgo de explosiones.
- Limitar los daños a la estructura y equipamiento del túnel.

En función del tipo de sistema de ventilación disponible, la PIARC recomienda una estrategia u otra. A continuación, se explican las diferentes estrategias de ventilación recogido en el informe de la PIARC: Túneles de Carretera: Estrategias de control de la ventilación en situación de emergencia [13]

Las estrategias explicadas a continuación, se refieren a la fase de autoevacuación, que es la fase crítica durante el incendio, al ser los primeros minutos desde el comienzo del incendio.

Aparte del sistema de ventilación utilizado, las estrategias de ventilación a adoptar dependerán del tipo de túnel, y de las condiciones ambientales y de tráfico existente antes de que se produzca el incidente.

2.2.3.3.1 VENTILACIÓN LONGITUDINAL

Se presentan las siguientes premisas recogida en el informe [13], sobre las estrategias a adoptar en función del tipo de tráfico existente antes de producirse un incendio:

- CASO A: Tráfico unidireccional sin congestión. Impulsar el aire en la dirección del tráfico para prevenir o al menor minimizar el retorno del humo. Este caso se da en túneles de un único sentido y donde no haya colas de vehículos detenidos en el interior. Al producirse un incendio, los vehículos situados aguas abajo del foco (en el sentido del tráfico) pueden continuar su camino hacia el exterior del túnel. Por el contrario, en el otro lado los vehículos quedan retenidos en su avance.

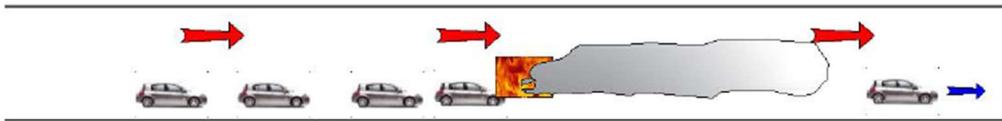


Figura 2.15. Túnel unidireccional sin congestión. Ventilación longitudinal

- CASO B: Tráfico unidireccional con congestión. Disponer de velocidades de la corriente de aire relativamente bajas (ej. $1,2 \pm 0,2$ m/s) en la dirección del tráfico con el fin de minimizar la propagación del humo aguas arriba, permitir la estratificación del humo, favorecer la dilución de gases tóxicos y permitir la evacuación de las personas. Este caso se suele dar en túneles urbanos de cierta longitud o interurbanos con condiciones específicas (altos niveles de tráfico, singularidades geométricas de reducción de capacidad) formándose colas que afectan al estado del tráfico. Es preciso diferenciar dos etapas:
 - Fase de autoevacuación: en la que el objetivo de las actuaciones de ventilación será mantener durante el mayor tiempo posible la estratificación de los humos lo que mejora las condiciones de evacuación de los usuarios. Esta estrategia deberá basarse en la reducción de los efectos que ocasionen la desestratificación de los humos (reduciendo la impulsión de aire fresco al túnel, evitando el arranque de aceleradores en las proximidades del foco y, si es posible, reduciendo la corriente longitudinal del aire).
 - Fase de expulsión: en la que se busca una actuación idéntica a la propuesta para tráfico unidireccional sin congestión. Esta fase implicará que los humos, desestratificados, barrerán el túnel desde el foco hasta la salida o punto de extracción más próximo.
- CASO C: Tráfico bidireccional. La actuación en caso de incendio resulta mucho más compleja ya que existen vehículos ambos lados del foco. Deben mantenerse velocidades de la corriente de aire relativamente bajas para evitar la inversión de la dirección de la misma, salvo que las circunstancias hagan necesario elegir otra medida (por ejemplo, fuego cerca de las bocas del túnel), permitir la estratificación del humo y posibilitar el escape de las personas en ambas direcciones.

2.2.3.3.2 VENTILACIÓN TRANSVERSAL O SEMITRANSVERSAL

- CASO A: Tráfico unidireccional sin congestión: En la dirección del tráfico, aguas arriba de la zona de extracción del humo, la velocidad de la corriente de aire impedirá o reducirá al mínimo el retorno del humo. En el lado aguas abajo, se establecerá una velocidad pequeña de la corriente de aire hacia la zona de extracción.
- CASO B: Tráfico unidireccional con congestión. Como consecuencia de las corrientes de aire provenientes de ambos lados hacia la zona de extracción, la velocidad longitudinal será nula en el centro de la zona de extracción, en este caso, el objetivo de la corriente de aire es mantener la estratificación y, si es posible, confinar los humos en los alrededores de la zona de extracción.
- CASO C: Tráfico bidireccional: Como consecuencia de las corrientes de aire provenientes de ambos lados hacia la zona de extracción, la velocidad longitudinal será nula en el centro de la zona de extracción, en este caso, el objetivo de la corriente de aire es mantener la estratificación y, si es posible, confinar los humos en los alrededores de la zona de extracción.

Las condiciones ambientales cambiantes en el interior del túnel en el desarrollo de un incendio, el comportamiento ingenuo de las personas y la gran variedad de tipologías de túneles hacen que se considere necesario analizar en particular cada túnel y en cada momento, para establecer la estrategia de ventilación idónea.

2.3 NORMATIVA SOBRE TÚNELES

2.3.1 SISTEMA DE VENTILACIÓN

En las últimas décadas, se han producido muchos accidentes con daños graves en una serie de túneles. Esto, unido al envejecimiento progresivo que se viene apreciando en los túneles existentes, al aumento del volumen de tráfico y, al cada vez mayor uso de los túneles como soluciones constructivas de menor impacto ambiental y óptima solución económica, han movilizad a la sociedad a exigir la adopción de decisiones políticas encaminadas a mejorar la seguridad de estas infraestructuras y en consecuencia la seguridad de las personas.

Así en el año 2004, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea adoptan el 29 de abril la Directiva 2004/54/CE con el objetivo de garantizar un nivel mínimo de seguridad a los usuarios de la carretera en los túneles de la Red Transeuropea de carreteras, de longitud superior a 500 metros, tanto si están en fase de proyecto como en construcción.

A continuación, se enumeran las principales normativas de aplicación en España y diversas normativas de reconocido prestigio de diferentes países con un elevado número de túneles, que son ampliamente utilizadas y sirven de base para la toma de decisiones de planificación y proyectos en los respectivos países:

1. Directiva Europea 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de Seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.
2. Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado Español.
3. Decreto Foral 135/2006, de 23 de agosto, sobre seguridad de túneles en carreteras, y Decreto Foral 91/2012 de la Diputación Foral de Bizkaia, de 24 de abril, por el que se aprueban las Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación en Túneles de Carreteras de Bizkaia.
4. CIRCULAR 03/05 de la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Catalunya sobre las especificaciones técnicas para el equipamiento de túneles de obras de carretera.
5. Instrucción técnica de túneles viarios urbanos de la ciudad de Barcelona (ITT).
6. Circular Interministerial Nº 2006-20 del 29 de marzo de 2006 relativa a la seguridad de túneles de carreteras de Francia.
7. NFPA 502:2020 Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways.
8. Manual para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de Carretera del Ministerio de Transportes de Colombia (INVIAS).

A continuación, se incluyen los requisitos exigidos en cada una de las normativas citadas:

1. Directiva Europea 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de Seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.

Esta Directiva obliga a los Estados miembros a transponerla a sus respectivos marcos jurídicos y marca además plazos para la adaptación de los túneles existentes de esas características.

En su anexo I, incorpora las medidas de seguridad y requisitos mínimos a disponer en los túneles en función del tráfico (vehículos/día por carril) y longitud del túnel. Hay ciertos requisitos que depende su obligatoriedad de si está permitido el paso de vehículos de MMPP o de la tipología de túnel a la circulación de vehículos (unidireccional o bidireccional).

En lo que se refiere al sistema de ventilación, exige lo siguiente:

Tabla 2.2. Requerimientos de la DE 2004/54/EC en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia

Apartado	Prescripción DE 2004/54/CE
2.9.2	<i>“En todos los túneles de longitud superior a 1 000 metros con un volumen de tráfico superior a 2 000 vehículos por carril, deberá instalarse un sistema de ventilación mecánica.”</i>
2.9.3	<i>“La ventilación longitudinal se utilizará únicamente en los túneles con circulación bidireccional o unidireccional congestionada si un análisis del riesgo conforme al artículo 13 muestra que es aceptable, o si se toman medidas específicas, tales como una apropiada gestión del tráfico, una reducción de la distancia entre salidas de emergencia y la colocación de extractores de humo a intervalos.”</i>

2. Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

El RD 635/2006 es la transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva Europea, siendo en algunos casos más restrictiva que la misma.

Establece los requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, y en concreto los equipamientos mínimos a implantar según la tipología del túnel, que viene

categorizada en función del tipo de circulación (unidireccional o bidireccional), su longitud, su situación (urbano o interurbano) y su Intensidad Media Diaria (IMD) de circulación.

Tal y como la Directiva Europea, los requisitos de seguridad afectan no solamente a la infraestructura y equipamientos de seguridad sino también a lo referente a la Gestión y Explotación del Túnel.

En lo que se refiere al sistema de ventilación, exige lo indicado en la siguiente tabla:

Tabla 2.3. Requerimientos del RD 635/2006 en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia

Apartado	Prescripción RD 635/2006
2.11.1	<p><i>“Todos los túneles que requieran sistema de ventilación artificial, de acuerdo con el apartado 2.21, deberán contar con su correspondiente sistema de automatismo.”</i></p> <p><i>Según el 2.21, todos los túneles interurbanos de más de 500 m y urbanos de más de 200 m deben disponer de sistema de ventilación.</i></p>
2.11.2	<p><i>“El proyecto, la construcción y la explotación del sistema de ventilación deberán tener en cuenta:</i></p> <p><i>el control de los contaminantes emitidos por los vehículos de carretera en un flujo de tráfico normal y denso,</i></p> <p><i>el control de los contaminantes emitidos por vehículos de carretera en el caso de que el tráfico esté detenido a causa de un incidente o accidente, el control del calor y el humo en caso de incendio.”</i></p>
2.11.3	<p><i>“La ventilación longitudinal se utilizará únicamente en los túneles con circulación bidireccional o unidireccional congestionada si un análisis del riesgo conforme al artículo 11 muestra que es aceptable, o si se toman medidas específicas, tales como una apropiada gestión del tráfico, una reducción de la distancia entre salidas de emergencia y la colocación de extractores de humo a intervalos adecuados.”</i></p>
2.11.4	<p><i>“Los sistemas de ventilación deberán poder extraer el humo para un incendio tipo con potencia mínima de 30 MW y caudal mínimo de humos de 120 m³/s.</i></p> <p><i>La ventilación en las galerías será independiente.”</i></p>
2.11.5	<p><i>“En túneles urbanos de longitud mayor que 200 metros es obligatoria la instalación de un sistema de ventilación.”</i></p>
2.11.6	<p><i>“Los sistemas de ventilación transversal o semitransversal se utilizarán en aquellos túneles que requieran un sistema de ventilación mecánica y</i></p>

Apartado	Prescripción RD 635/2006
	<i>para los que no se haya autorizado una ventilación longitudinal de conformidad con el punto 2.11.3. Estos sistemas deberán poder extraer el humo en caso de incendio.”</i>
2.11.7	<p><i>“Para los túneles de longitud superior a 1.000 metros, de tráfico bidireccional, con un volumen de tráfico superior a 1.000 vehículos por carril, dotados de un centro de control y de ventilación transversal o semitransversal, deberán adoptarse las siguientes medidas mínimas relativas a la ventilación:</i></p> <p><i>se instalarán reguladores de aire y humo que puedan funcionar separadamente, la velocidad del aire longitudinal deberá controlarse constantemente, y el proceso de control del sistema de ventilación (reguladores, ventiladores, etc.) deberá ajustarse en consecuencia.”</i></p>

A continuación, se enumera otras normativas de referencia autonómicas y municipales, tales como:

3. **Decreto Foral 135/2006, de 23 de agosto, sobre seguridad de túneles en carreteras, y Decreto Foral 91/2012 de la Diputación Foral de Bizkaia, de 24 de abril, por el que se aprueban las Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación en Túneles de Carreteras.**

En base a la competencia exclusiva de la Diputación Foral de Bizkaia en la planificación, proyecto, construcción, conservación, modificación, financiación, uso y explotación de carreteras y caminos de su Territorio Histórico, según Ley 27/1983, de 25 de noviembre de Relaciones entre las Instituciones Comunes de la Comunidad Autónoma y los órganos forales de sus Territorios Históricos (LTH), la Diputación aprobó el Decreto Foral 135/2006, de 23 de agosto sobre seguridad de túneles en carreteras que supuso, respetando la normativa interna de obligado cumplimiento, la adaptación de la Directiva a las especificidades de Bizkaia y la extensión de los requerimientos a todos los túneles de la red foral de carreteras de Bizkaia.

En 2008, se aprobó, por Decreto Foral 134/2008, de 20 de agosto, las Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación en túneles de carreteras, que permaneció en vigor hasta el 2012.

Debido al continuo desarrollo de las tecnologías utilizadas en las instalaciones de seguridad de los túneles de carretera, y su necesaria adaptación a los cambios tecnológicos y a la adaptación a las nuevas exigencias de la sociedad y a los nuevos hábitos del uso del transporte, así como a la situación económica existente, se aprobó el 24 de abril de 2012 el Decreto Foral 91/2012, por el que se determinan las nuevas Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación en Túneles de Carreteras.

Los criterios para la clasificación de túneles atendiendo a su nivel de riesgo son (a) la longitud del túnel, (b) el volumen de tráfico soportado o que se prevé que soporte el túnel, incluyendo la probabilidad y frecuencia de congestión de tráfico dentro del túnel, (c) el sentido de la circulación por tubo (único o doble) y (d) otros factores de riesgo relevantes, como la pendiente del túnel o su trazado.

Los tres umbrales de longitud de túnel establecidos son:

- L1=500 m
- L2=350 m
- L3=200 m

Y aparte, se establece un umbral para el nivel de servicio: NS1, que tiene en cuenta la posibilidad de congestión en el túnel en un plazo cercano.

A partir del nivel de servicio y su longitud, atendiendo a su nivel de riesgo, los túneles se clasifican en tres tipos: I, II y III, siendo los de clase I los de mayor riesgo:

Tabla 2.4. Clases de túnel. Normativa Bizkaia (DF 135/2006) [16]

Clase	Criterio
I	<ul style="list-style-type: none"> — Túneles de longitud superior a L1. — Túneles cuya longitud está comprendida entre L2 y L1 que superan el umbral NS1. — Túneles con otros factores de riesgo que hacen aconsejable su catalogación en esta clase.
II	<ul style="list-style-type: none"> — Túneles de longitud superior a L3 que no son de clase I. — Túneles con otros factores de riesgo que hacen aconsejable su catalogación en esta clase.
III	— Túneles que no son de clase I ni II.

Se muestra en la siguiente tabla los requerimientos de la D.F. 91/2012 en el ámbito de la ventilación:

Tabla 2.5. Requerimientos del D.F. 91/2012 en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia

Apartado	Prescripción D.F. 91/2012
Anexo IV. Apartado 4.6	<i>“En el ámbito de aplicación de la presente norma, y prescindiendo de las ventajas y desventajas de otros tipos de ventilación, se utilizará Ventilación de Tipo Longitudinal, salvo que por las especiales características del túnel a estudio, el diseñador demuestre la necesidad de ser utilizado cualquier otro tipo, pudiéndose utilizar otros sistemas de ventilación como longitudinal con extracción intermedia, transversal, semitransversal...”</i>
Anexo IV. Apartado 4.7	<p><i>TÚNELES UNIDIRECCIONALES</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Es necesaria la ventilación sanitaria y de emergencia para túneles de Tipo I (túneles de más 500 metros o congestionables de más de 350 metros).</i> - <i>Se deberá analizar para túneles de Tipo II en función de las situaciones de riesgo previsible y de la posible compatibilidad de la ventilación sanitaria y la de emergencia.</i> - <i>No es necesaria ventilación en túneles de Tipo III.</i> <p><i>TÚNELES BIDIRECCIONALES</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Es necesaria la ventilación sanitaria para túneles de Tipo I (túneles de más 500 metros o congestionables de más de 350 metros).</i> - <i>Se deberá analizar su implantación en túneles de Tipo II en función de las situaciones de riesgo previsible y de la posible compatibilidad de la ventilación sanitaria y la de emergencia y en túneles congestionables de más de 350 m.</i> - <i>No es necesaria ventilación en túneles de Tipo III.</i>

A modo de resumen, se expresa la siguiente tabla:

Tabla 2.6. Resumen requerimiento del D.F. 91/2012 en relación a la ventilación [17]

Tipo	Ventilación Sanitaria Forzada		Ventilación de Emergencia	
	Unidireccional	Bidireccional	Unidireccional	Bidireccional
Tipo I (L>500 m y congestionable de L>350 m)	SI	SI	SI	SI*
Tipo II	Se justificará su necesidad mediante cálculos			
Tipo III	NO	NO	NO	NO

* Se analizará su implantación en túneles congestionables de L > 350 m.

Este Decreto, a diferencia de la Directiva Europea 2004/54/CE o del Real Decreto 635/2006, incluye extensas instrucciones y especificaciones de gran valor sobre el diseño, puesta en servicio y mantenimiento de los equipos que forman un sistema de ventilación.

4. CIRCULAR 03/05 de la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Catalunya sobre las especificaciones técnicas para el equipamiento de túneles de obras de carretera.

El 27/04/2005, la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Cataluña, aprobó las *Especificaciones técnicas para el equipamiento de los túneles*, que figura en la Circular 03/05.

En aquel momento, todavía no se había aprobado la transposición a nivel nacional de la Directiva Europea (el RD 635/2006).

Para la redacción de estas Especificaciones, se tuvo en cuenta la propia D.E. 2004/54/CE y la Circular interministerial nº 200-63 de 25 de agosto de 2000 relativa a la seguridad en los túneles de la red vial nacional de Francia (Ministerio del Interior, Francia).

Estas Especificaciones se aplican a los proyectos constructivos y a las obras en ejecución y de mantenimiento de los equipamientos de los túneles de la red viaria de la Generalitat de Cataluña.

Los túneles se clasifican en tres tipos según su equipamiento: E1, E2 y E3, siendo los de clase E3 a los que se les exige la totalidad del equipamiento indicado en la normativa:

- Tipo E1 (nivel de equipamiento bajo): túnel de reducida longitud.
- Tipo E2 (nivel de equipamiento medio): Túnel bidireccional o 2 tubos unidireccionales.
- Tipo E3 (nivel de equipamiento alto): grupo de túneles de 2 tubos unidireccionales.

Todos los túneles objeto de estas especificaciones técnicas, deben tener como mínimo un nivel E1. En este nivel se exige disponer iluminación, control de iluminación y semáforos.

Para los túneles a partir del nivel de equipamiento E2, se exigen disponer de ventilación.

Se muestra en la siguiente tabla los requerimientos de la OC 03/05 en el ámbito de la ventilación:

Tabla 2.7. Requerimientos del Circular 03/05 en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia

Apartado	Prescripción Circular 03/05
8.1	<i>“Para cada túnel en particular deberá realizarse el correspondiente estudio de ventilación, el cual determinará el régimen de su explotación en situación de normalidad, con congestión y en situación de incendio (localizado en varios lugares del túnel). También determinará el tipo de ventilación más adecuado para cada tipo de túnel: longitudinal, transversal o semitransversal.</i>

El principal objetivo de estas Especificaciones es unificar y establecer unos criterios generales de cómo debe ser el sistema de gestión de los túneles y facilitar el mantenimiento y el servicio, e integración de la gestión de todos los túneles de la red viaria de Cataluña desde una única aplicación (multitúnel), ubicada en el actual Centro de Control de Carreteras de Vic.

En la Circular no clasifica a los túneles según tráfico o longitud, únicamente indica tres niveles de equipamiento que debe disponer, haciendo especial atención a las comunicaciones con su Centro de control. Por ello, a la hora de decidir qué instalaciones y equipamiento debe tener un túnel en función de su longitud, tráfico o tipología, estas

Especificaciones deben ser un complemento a la D.E. 2004/54/CE y no una sustitución de la misma.

5. Instrucción técnica de túneles viarios urbanos de la ciudad de Barcelona (ITT)

El 20/03/2016 fue aprobada por la Comisión de Gobierno del Ayuntamiento de Barcelona, la *Instrucción técnica de túneles viarios urbanos de la ciudad de Barcelona*, por la que se regula las condiciones que deben cumplir los túneles viarios de la ciudad para garantizar la seguridad de las personas, del medio ambiente y de las mismas infraestructuras.

Esta Instrucción constituye una reglamentación técnica para el diseño, construcción y explotación de los túneles viarios en el municipio de Barcelona. Con estas especificaciones técnicas se pretende conseguir una unificación de criterios en cuanto al equipamiento para túneles urbanos de nueva construcción, y en la renovación de los existentes. También se pretende integrar la gestión de todos los túneles desde una única aplicación implantada en el Centro de Control de Túneles.

En la redacción de estas especificaciones técnicas se han tenido en cuenta especialmente las especificaciones contenidas en la D.E. 2004/54/CE, en el R.D. 635/2006 y en la Circular 3/05. También se han analizado otros documentos, como las directrices estándar elaboradas por la National Fire Protection Association, contenidas en la "NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways", edición 2014, o los trabajos incorporados al proyecto de ordenanza de túneles urbanos, revisado en 2013.

Los factores considerados en la normativa para clasificar a los túneles son los siguientes:

- Longitud del túnel
- Circulación unidireccional o bidireccional

Tabla 2.8. Clasificación de túnel. Normativa ITT Ayuntamiento de Barcelona [18]

CIRCULACIÓ	LONGITUD DEL TÚNEL (metres)			
	100	200	400	1000
Unidireccional	A	B	C	D
Bidireccional	A*	No es contempla la seva construcció en àmbit urbà		

Se resume en la siguiente tabla los requerimientos de la ITT en el ámbito de la ventilación:

Tabla 2.9. Requerimientos de la ITT en relación a la ventilación. Fuente: elaboración propia

Apartado	Prescripción ITT - Ayuntamiento de Barcelona
Anexo 3. Apartado 2.1	<i>“En túneles unidireccionales de longitud mayor de 200m, será obligatoria la instalación de un sistema de ventilación mecánico dotado de sistema de control automático. En los bidireccionales siempre se instalará ventilación de tipo sanitario.”</i>
Anexo 3. Apartado 2.2	<i>“La aplicación de cada tipo de ventilación se realizará de acuerdo a la tipología de túnel, y a su longitud, según se define en la siguiente tabla:</i>

A continuación, se incluye la siguiente tabla extraída de la ITT, donde se define el tipo de ventilación según la tipología de túnel:

Tabla 2.10. Tabla resumen requerimiento de la ITT en relación a la ventilación [18]

CIRCULACIÓ	LONGITUD DEL TÚNEL (metres)		
	100	200	1000
Unidireccional	Natural	Longitudinal (*)	Longitudinal (**)
Bidireccional	Longitudinal Sanitària	No es contemplan	

(*) Para túneles entre 500m y 1000m, la ventilación longitudinal será complementada por un sistema de extracción de humos independiente a la ventilación, si un análisis de riesgo

determina que el túnel es intrínsecamente inseguro por congestión extrema, atascos, etc... o bien longitudinal y la implementación de medidas de seguridad compensatorias como aumento de salidas de emergencia, sistemas de control de accesos para el cierre de túnel, etc...

*(**) Complementada por un sistema de extracción de humos independiente a la ventilación.*

Los sistemas de ventilación recomendados en la tabla anterior son los mínimos necesarios. Por lo tanto, siempre podrán ser sustituidos por otros de mayor efectividad.

A continuación, se citan otras normas internacionales de aplicación a túneles de carretera de organizaciones de reconocido prestigio que se han revisado:

6. NFPA 502:2020 Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways.

Normativa americana de gran prestigio, utilizada frecuentemente y a tener en cuenta en la seguridad y protección contra incendios en túneles.

Determina los requisitos mínimos de protección contra incendios en función de la longitud del túnel, siendo:

- (1) Categoría X: Cuando la longitud del túnel es inferior a 90 m.
- (2) Categoría A: Cuando la longitud del túnel es mayor a 90 m.
- (3) Categoría B: Cuando la longitud del túnel es igual o superior a 300 m.
- (4) Categoría C - Cuando la longitud del túnel es igual o superior a 1000 m se aplicarán todas las disposiciones de la presente norma.

Sus principales requerimientos en lo que respecta a la ventilación son:

Tabla 2.11. Requerimientos de la NFPA 502:2020 en relación a la ventilación.[19]

Apartado	Prescripción NFPA 502
11.1.2	<i>“Se requerirá ventilación forzada en túneles de longitud superior a 1.000 m”</i>
11.2.3	<p><i>“En túneles con tráfico bidireccional en los que los usuarios puedan estar en ambos lados del foco del incendio, se deberán atender los siguientes objetivos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <i>-Se mantendrá la estratificación de humos.</i> <i>-La velocidad longitudinal del aire en el interior del túnel se mantendrá en valores bajos.</i> <i>-La extracción del humo a través de aperturas en el techo o aperturas a cota elevada en la(s) paredes son medidas efectivas y deberán ser consideradas.”</i>
11.2.4	<p><i>“En túneles con tráfico unidireccional en los que los usuarios puedan estar ubicados aguas arriba del incendio, se deberán atender los siguientes objetivos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> (1) Sistemas longitudinales <ul style="list-style-type: none"> (a) Control del backlayering produciendo una corriente de aire en dirección del tráfico. (b) Minimizar la ruptura de la capa de humo. (2) Sistemas transversales o semitransversales reversibles <ul style="list-style-type: none"> (a) Maximizar la tasa de escape en la zona de ventilación que contiene el fuego y reducir al mínimo la cantidad de aire exterior que se introduce por un sistema transversal (b) Crear un flujo de aire longitudinal en la dirección del flujo de tráfico mediante la operación de la zona de ventilación aguas arriba en el máximo de inyección y la zona de ventilación aguas abajo en el máximo de extracción.

7. Circular Interministerial N° 2006-20 del 29 de Marzo de 2006 relativa a la seguridad de túneles de carreteras de Francia.

El 25 de agosto del año 2000, se publicó la Circular Interministerial francesa, la cual fue anulada tras su actualización en el año 2006, a excepción del Anexo 2, que se mantiene en vigor (*Annexe n° 2.- Instruction technique relative aux dispositions de securite dans les nouveaux tunnels routiers: Conception et Exploitation*) [20].

La presente instrucción tiene por objeto definir las medidas de seguridad a adoptar en los nuevos túneles de carretera del estado francés, para permitir la protección y evacuación de los usuarios y la intervención de los servicios de emergencia en caso de incidente o accidente, así como para limitar las consecuencias de tal evento.

Es de aplicación para túneles con una longitud mayor a 300 metros. Para túneles con varios tubos, se aplica en cuanto un tubo supere esta longitud.

Tabla 2.12. Requerimientos de la normativa francesa en relación a la ventilación.
Fuente: elaboración propia.

Apartado	Prescripción Circular Interministerial N° 2006-20
Anexo II. Apartado 3.2.2	<p><i>Se requieren disposiciones para garantizar la extracción de humo a partir de las siguientes longitudes:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>300 metros para un túnel urbano.</i> - <i>500 metros para un túnel no urbano con tráfico que no sea de baja intensidad. Este límite podría alcanzar 800 metros, a condición de compensar la ausencia de extracción de humos reforzando instalaciones de evacuación y de protección de los usuarios tales como nichos seguros, galerías de evacuación,...</i> <p><i>El túnel de tráfico de baja intensidad se define como aquel cuyo tráfico previsible en cada sentido, diez años después de la puesta en servicio, es inferior tanto a los 2000 vehículos diarios de media anual como a los 400 vehículos en hora punta. Para la apreciación de esos criterios, los vehículos pesados se computan como 5 vehículos automóviles.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>1000 metros para un túnel no urbano de baja intensidad de tráfico.</i>

Además, en esta normativa, se define cuándo usar y dimensionar, según el caso, diferentes aspectos como la elección del tipo de ventilación, los sistemas de extracción de humos y criterios para su diseño, según el tipo y dimensiones del túnel que consiga, en caso de incendio extraer los humos y asegurar la evacuación de los usuarios y la entrada de los equipos de emergencia. Se fijan caudales de extracción de humos, separación de aparatos de extracción, velocidad máxima y mínima de extracción de humos.

8. Manual para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera del Ministerio de Transportes de Colombia (INVIAS).

En el año 2021, se actualizó la normativa de referencia para los túneles de Colombia, la cual se publicó en 2015. Establece 5 Clases de Túneles (Clases A, B, C, D y E) en función de la longitud del túnel (m) y el volumen de tráfico “TPDA, Tránsito Promedio Diario Anual” por carril.[21]

En base a la clase de túnel se señalan aquellos en los que se han de disponer obligatoriamente (así como los opcionales) sistemas de ventilación y sus correspondientes dispositivos de control.

- Clase A: Longitud mayor de 3.000 metros con tránsito promedio diario anual por carril (TPDA) mayor a 100 vehículos; o longitud mayor de 500 metros con TPDA mayor a 10.000 vehículos.
- Clase B: Longitud mayor de 1.000 metros y menor o igual a 3.000 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 10.000 vehículos; o longitud mayor de 500 metros y menor o igual a 3.000 metros, con TPDA mayor de 4.500 vehículos y menor o igual a 10.000 vehículos.
- Clase C: Longitud mayor de 500 metros y menor o igual a 1.000 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 4.500 vehículos; o longitud mayor de 250 metros y menor o igual a 500 metros, con TPDA mayor a 4.500 vehículos.
- Clase D: Longitud mayor de 250 metros y menor o igual a 500 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 4.500 vehículos; o longitud mayor de 100 metros y menor o igual a 250 metros, con TPDA mayor a 4.500 vehículos.

- Clase E: Longitud mayor de 50 metros y menor o igual a 250 metros con TPDA mayor de 100 vehículos y menor o igual a 4.500 vehículos.

Se presenta a continuación el siguiente gráfico extraído de la propia normativa, que ilustra lo indicado:

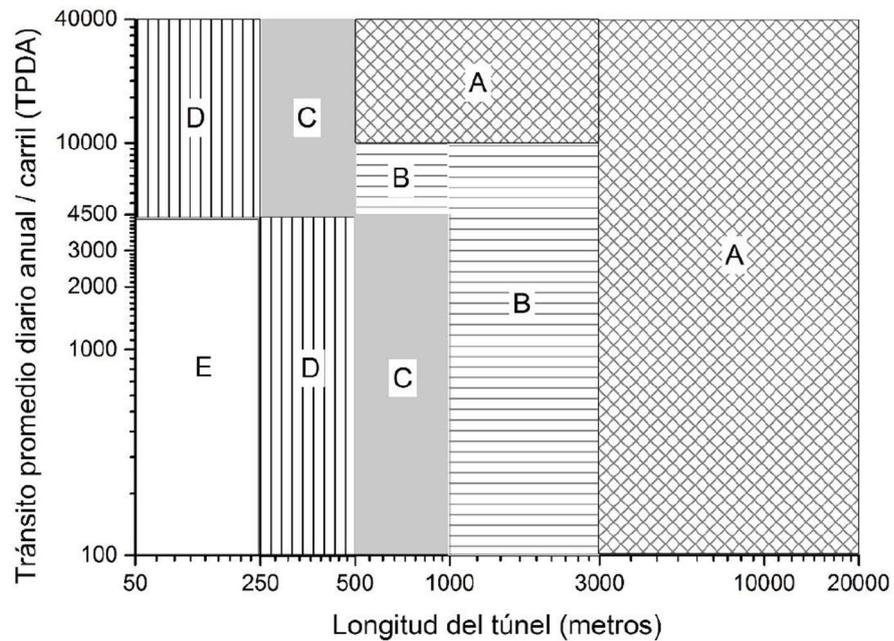


Figura 2.16. Clasificación de túneles viales por longitud y TPD en Colombia [21]

En lo que se refiere a la ventilación, la normativa recomienda el sistema de ventilación a instalar en función del tipo de túnel:

Tabla 2.13. Tipo de ventilación. Tabla 7-5 del Manual [21]

Tráfico	Tráfico promedio diario anual/carril	Longitud del túnel (m)	Tipo de ventilación
Tráfico unidireccional	-	≤ 500	Natural
	< 4.500 y sin frecuencia de congestión	≤ 700	Natural
	≥ 4.500 y < 10.000 y sin frecuencia de congestión	500 – 5.000	Longitudinal
	≥ 4.500 y con frecuencia de congestión	500 – 1.500	Longitudinal
	≥ 4.500 y con frecuencia de congestión	1.500 – 5.000	Semi transversal, transversal o longitudinal con punto de extracción masiva
	-	> 5.000	Aspiración de aire de escape con falso techo
Tráfico bidireccional	-	≤ 500	Natural
	< 4.500	≤ 700	Natural
	< 4.500	700 – 3.000	Longitudinal
	< 9.000	500 – 2.000	Longitudinal
	≥ 9.000	500 – 1.500	Longitudinal
	< 4.500	> 3.000	Semi transversal, transversal o longitudinal con punto de extracción masiva
	< 9.000	> 2.000	
	≥ 9.000	> 1.500	

Tras un análisis exhaustivo de las principales normativas sobre seguridad en túneles de carretera, el siguiente paso es el diseño y estudio del sistema de ventilación, aplicando los requerimientos y recomendaciones indicadas. Antes de ello, se analiza en el siguiente punto las referencias que hacen las diferentes normativas a la generación energética mediante fuentes de energía renovable en los túneles de carretera.

2.3.2 ENERGÍAS RENOVABLES

En las diferentes normativas específicas para túneles no se hace ninguna mención a la disposición de sistemas de energías renovables como generación de energía para el suministro de las instalaciones del túnel.

La única excepción, la encontramos en la **Instrucción técnica de túneles viarios urbanos de la ciudad de Barcelona (ITT)**, donde indica de manera abreviada los siguientes criterios respecto a la eficiencia energética y autosuficiencia (apartado 1.7.1):

“En los proyectos en los que la administración lo determine, ya sea que por las facilidades en el entorno o por la disponibilidad de espacio en la zona de las bocas, se promoverá incluir en el proyecto la implantación de sistemas propios de producción de energía, ya sea a base de paneles de generación de energía fotovoltaica, o bien de otros sistemas de aportación de energía para generación de energía eléctrica”.

Durante los últimos años, el Ayuntamiento de Barcelona, está llevando a cabo diferentes proyectos de instalación de plantas fotovoltaicas en zonas cercanas a los túneles, como generación de energía para las instalaciones de los túneles. Se destaca:

- En el túnel de la Badal (Figura 2.17), compuesto de dos tubos unidireccionales de longitud 2,2 km, ubicado en la ciudad de Barcelona, se ha instalado en la parte superior de la boca sur, una planta fotovoltaica de 66 kWp de potencia, compuesta por módulos monocristalinos de 275 Wp. Se estima una generación de energía de 80,17 MWh/año.



Figura 2.17. Túnel de la Rovira. Instalación de planta FV en boca sur. Fuente: <https://ajuntament.barcelona.cat/>

- En el túnel de Villa Olímpica, de longitud 814 m, ubicado en la Ronda Litoral de Barcelona, se prevé instalar en una pérgola ubicada encima de una de las bocas de acceso al túnel, 48 módulos fotovoltaicos (Figura 2.18), resultando una potencia pico de 21,6 kWp. Se estima una generación de energía de 36 MWh/año.



Figura 2.18. Túnel de Villa Olímpica. Fuente: Proyecto de mejora del túnel

Si bien es cierto, que la mayoría de las normativas de obligado cumplimiento para túneles, (véase 2.3.1), han sido elaboradas hace más de una década, donde el enfoque, como ya se ha comentado en la introducción del presente TFM, era la seguridad en los túneles, y donde la generación de energía eléctrica provenientes de energía renovables no era un punto a debate.

Actualmente, aun no siendo exigido por dichas normativas, se están llevando a cabo por parte de los gobiernos, estrategias y planes de descarbonización y mejora de la eficiencia energética en los túneles de carretera, entre los que se encuentra la instalación de huertos solares que provoquen la autosuficiencia del alumbrado de los túneles.

3 Caso de estudio

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se procederá al diseño de un sistema de ventilación de emergencia y al estudio de la instalación de un suministro de energía complementario mediante módulos fotovoltaicos en un túnel de carretera.

El túnel seleccionado para estudio es el túnel de Erinyà, de 630 metros de longitud, ubicado en la provincia de Lérida, en la comarca Pallars Jussà, en la N-260, entre los PKs. 314+411 y 315+096.



Figura 3.1 Situación. Túnel de Erinyà

Tras el análisis en el apartado 2.3, de las normativas nacionales e internacionales, se ha podido establecer una primera aproximación de los requisitos exigidos en el ámbito de la ventilación en un túnel de carretera, en función de sus características.

En lo que respecta al uso de energía renovables, como suministro de energía, no hay una legislación a nivel nacional que obligue al uso de las mismas en los túneles de carretera.

El Real Decreto 635/2006 es la normativa de aplicación para el túnel de Erinyà en el ámbito de la seguridad de túneles. La tipología del RD 635/2006 que define los requisitos mínimos de infraestructura e instalaciones a disponer es la siguiente:

Túnel Bidireccional de longitud igual o menor que 1.000 metros y mayor que 500 metros con una IMD por carril inferior a 2.000 vehículos/día e interurbano

El túnel de Erinyà no cumple con gran parte del equipamiento que se exige según su tipología. Entre las instalaciones requeridas se encuentra disponer de un sistema de ventilación. Actualmente, el túnel de Erinyà no dispone de ventilación mecánica.

A modo de comparación con el R.D.635/2006, y tras el análisis realizado de las principales normativas internacionales, se presenta la siguiente tabla los requerimientos, en cuestiones de ventilación, que indican las normativas estudiadas para un túnel de las características del túnel de Erinyà:

Tabla 3.1. Requerimiento del sistema de ventilación de diferentes normativas. Fuente: elaboración propia

Normativas	¿Se exige ventilación para el túnel de Erinyà?	Requerimiento del sistema de ventilación para un túnel similar al Túnel de Erinyà
DE 2004/54/CE (red transeuropea)	No	No es necesario un sistema de ventilación mecánica. Exigible para túneles de más de 1000 m.
RD 635/2006 (RCE de España)	Sí	Túnel bidireccional superior a 500 m: Sistema de ventilación artificial . Será ventilación longitudinal si se muestra que es aceptable según un análisis de riesgo.
Decreto Foral 91/2012. (Diputación Foral de Bizkaia)	Sí	Túnel de clase I. Sistema de ventilación de emergencia .
Circular 03/05. Generalitat de Catalunya	Sí	Tipo de túnel E2. Se exige disponer de ventilación . Se deberá realizar el correspondiente estudio de ventilación, el cual determinará el tipo de ventilación más adecuado (longitudinal, transversal o semitransversal).
ITT (Ayuntamiento de Barcelona)	n/a	No se contemplan la construcción de túneles bidireccionales en el ámbito de la ciudad de Barcelona . Para túneles unidireccionales entre 500 m y 1000 m: la ventilación longitudinal será complementada por un sistema de extracción de humos independiente a la ventilación, si un análisis de riesgos determina que el túnel es inseguro, o bien longitudinal e implementando medidas de seguridad compensatorias.
Circular Interministerial Nº 2006-20 (Francia)	Sí	Túnel no urbano de longitud superior a 500 m: Sistema de ventilación de extracción de humos .
NFPA 502:2020 (americana)	No, pero...	Categoría B. No es necesario un sistema de ventilación mecánico . Exigible para túneles de más de 1000 m. Aun así, se debe realizar un análisis de ingeniería para justificar si se debe colocar o no ventilación de emergencia.
Normativa colombiana	Sí	Clase de túnel: "C". Túnel bidireccional de longitud entre 700 m -3000m con IMD <4500 veh/día: Se exige ventilación longitudinal .

3.2 DATOS CARACTERÍSTICOS

Junto a la boca norte del túnel de Erinyà se encuentra el edificio que alberga el Centro de Conservación del sector L-3 (zona Erinyà) y Centro de Control de una serie de túneles próximos entre sí.

Desde la boca norte del túnel y siguiendo la carretera N-260 hacia La Pobra de Segur, se encuentra a 1.150 metros el desvío hacia las localidades de Lluçà y Reguart y a 3.000 m, siguiendo la N-260, se encuentra la población de Senterada. En el lado sur, a 325 metros de la boca en sentido La Pobra de Segur, se encuentra el desvío hacia la localidad de Erinyà y hacia el congosto de Erinyà.

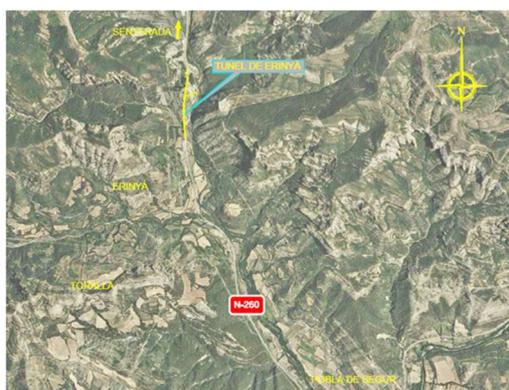


Figura 3.2. Fotografía aérea.
Fuente: Google earth



Figura 3.3. Fotografía de entrada al túnel.
Fuente: Fotografía propia

3.2.1 CARACTERÍSTICAS GEÓMETRICAS

Tabla 3.2. Datos geométricos. Fuente: elaboración propia

TÚNEL DE ERINYÀ	
Número de tubos	1
Tipo de tráfico	Bidireccional
IMD (2019, L-32-1)	
Total	1.648 veh./d
% de vehículos pesados	4,85 %

TÚNEL DE ERINYÀ	
Sección Longitudinal	
Longitud	630 m
Pendiente media	2,10 % (positivo sentido Pont de Suert)
Sección Transversal	
Geometría	Semicircular
Gálibo permitido	5,00 m
Número de carriles	2
Anchura de los carriles	
Carril derecho	3,62 m
Carril izquierdo	3,65 m
Anchura de zona intermedia	0,30 m
Anchura de los arcenes	
Arcén derecho	0,90 m
Arcén izquierdo	0,88 m
Anchura de las aceras	
Acera derecha	0,70 m (mín.) es variable
Acera izquierda	0,70 m (mín.) es variable
Anch. Total calz. + arcenes + aceras	10,75 m
Tipo de revestimiento	Roca natural
Velocidad máxima autorizada	80 km/h
Pavimento del túnel	Mezcla bituminosa en caliente

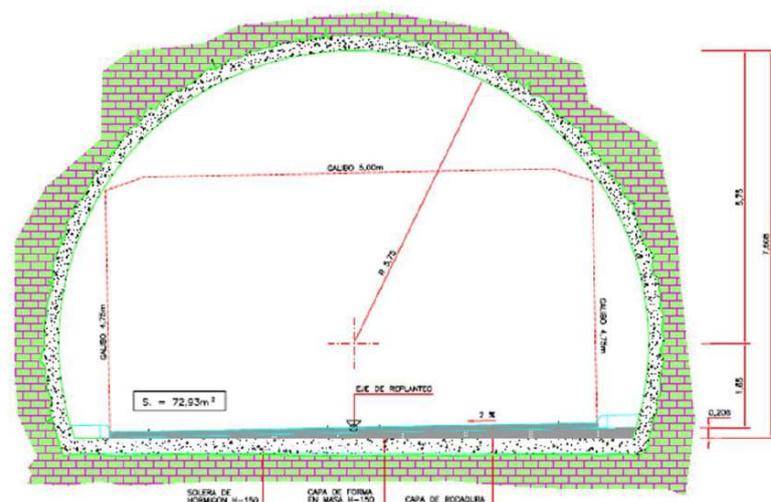


Figura 3.4. Sección transversal del túnel de Erinyà. Fuente: Proy. Modificado 07/1996

3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO

Los datos de tráfico son los relativos al año 2019. Para la obtención de los datos de tráfico se ha recurrido a los datos proporcionados por la estación de aforo más próxima al túnel, a través del Mapa de tráfico de la Dirección General de Carreteras de 2019 [22]:

Intensidad horaria

La intensidad de tráfico en hora punta se determina a partir de la IMD y del factor K, que indica la proporción de IMD que ocurre durante la hora punta:

$$IHP = IMD \cdot K \quad (3.1)$$

Ecuación 3.1. Intensidad en hora punta (IHP)

Si se tuviera que determinar la intensidad de tráfico en la hora punta en la dirección más cargada, se aplicaría la siguiente ecuación, donde D es la proporción de tráfico en la hora punta en la dirección más cargada:

$$IHPD = IMD \cdot K \cdot D \quad (3.2)$$

Ecuación 3.2. Intensidad de hora punta en la dirección más cargada

La intensidad horaria de proyecto se determina a partir de la intensidad en hora punta dividiéndola por el factor de hora punta (FHP), que permite obtener la intensidad en los 15 minutos más cargados de tráfico:

$$I = IHP / FHP; I = (IMD \cdot K) / FHP \quad (3.3)$$

Ecuación 3.3. Intensidad en los 15 min más cargados de tráfico

En ausencia de datos para los factores K, D y FHP se usan los siguientes, extraídos del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2010):

Tabla 3.3. Valores típicos por defecto para los factores FHP, K y D. Fuente: elaboración propia

Factor	Área	
	Urbana	Rural
FHP	0,92	0,88
K	0,09	0,11
R	0.55	0.55

Se incluye la siguiente tabla con los datos de tráfico resultantes:

Tabla 3.4. Datos de tráfico. Fuente: elaboración propia

Túnel-sentido	IMD (veh/d)	IMD /carril (veh/d)	IHP(veh/h/carril)	IMD veh.pesad (veh/d)	% Veh. Pesados	Veh.MMPP (veh/d)	%MMPP
T. Erinyà - 55%*IMD	1.657	911	100	59	6,46%	31	1,86%
T. Erinyà - 45%*IMD		746	82	48	6,46%		

3.2.3 CARACTERÍSTICAS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO

El suministro eléctrico del túnel de Erinyà se realiza en baja tensión a través de un transformador en poste, de propiedad de la compañía suministradora, situado próximo a la boca sur. El cuarto técnico donde están ubicadas las protecciones eléctricas está junto a la boca sur, en el margen derecho en sentido norte.

El sistema del suministro en baja tensión se complementa con un grupo electrógeno de 31,2 kVAs, que hace la función de suministro alternativo de energía.

El grupo electrógeno instalado proporciona una alimentación a 400V. Este grupo se encuentra instalado en una sala independiente junto a la sala de baja tensión. Además, se dispone de un SAI para evitar el corte de suministro a los equipos de control y sistemas críticos durante la transición entre el suministro principal y el alternativo.

3.3 SISTEMA DE VENTILACIÓN

A la hora de proyectar un sistema de ventilación el factor más importante a tener en cuenta es el de la seguridad, tanto en lo referente a la salud de los usuarios como en caso de incendio, que hace que sea imprescindible mantener los niveles de contaminantes (CO₂, Nox) bajo un límite determinado, garantizar la correcta evacuación de los usuarios en condiciones estables para la vida humana y permitir que los Servicios de Emergencia Exterior (SSEE) puedan realizar su trabajo de extinción.

El R.D. 635/2006 exige contar con un sistema de ventilación artificial con su correspondiente sistema de automatismo en los túneles bidireccionales interurbanos de más de 500 metros de longitud. Los sistemas de ventilación deberán poder extraer el humo para un incendio tipo con una potencia mínima de 30 MW y un caudal mínimo de humos de 120 m³/s.

3.3.1 ESTADO ACTUAL

Actualmente, el túnel de Erinyà no dispone de ventilación artificial por lo que se realiza un estudio para la mejora la seguridad del túnel mediante la instalación de este sistema.

3.3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN ELEGIDO

Tal y como se ha analizado en el apartado 2.2.3.3, los posibles sistemas para obtener unas condiciones ambientales idóneas en el interior del túnel, tanto en estado normal como en caso de incendio, son diversos y su adecuada elección puede tener gran influencia en aspectos económicos (actuación de obra civil), técnicos y en la propia seguridad global del túnel, siendo:

- Longitudinal con o sin pozo intermedio
- Transversal o semitransversal

Debido a la imposibilidad de poner una ventilación transversal o semitransversal en el túnel por condiciones económicas y técnicas muy desfavorables, se estudiará la aceptabilidad de un tipo de ventilación longitudinal. No se considera necesario disponer de pozos de ventilación intermedias en el trazado conectando con el exterior donde, en caso de

incendio, se expulsa el humo al exterior, ya que la longitud que presenta el túnel no lo justifica.



Figura 3.5. Vista del macizo de Erinyà y entrada al túnel por boca norte. Fuente: Fotografía propia

3.3.3 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DIMENSIONAMIENTO

La metodología empleada para el dimensionamiento de la ventilación se divide en dos fases:

1. **Dimensionamiento de la ventilación mediante la computación de todas las pérdidas de carga existentes en el túnel que deben ser vencidas por los ventiladores tanto para confort como para todas las posibles situaciones de incendio.**

La utilización de cálculos unidimensionales en el diseño permite realizar un dimensionado de los equipos de ventilación necesarios para alcanzar el criterio de diseño establecido. Con este tipo de cálculos se obtiene la posición crítica de incendio, basado en la búsqueda del escenario más desfavorable mediante la realización de todos los cálculos necesarios de forma iterativa, considerando múltiples posiciones de incendio a lo largo del túnel.

Para la realización de estos cálculos se han utilizado las fórmulas proporcionadas por PIARC en el informe “*Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels*” [23] y el CETU (Centre d'Études des Tunnels), en el “*Dossier pilote des tunnels. [Document n° 4]*,”

Équipements. Section 4.1, Ventilation." [24], las cuales realizan la suposición de que el sistema llega a un estado estacionario analizando todas las pérdidas de carga del sistema para la velocidad e incendio de diseño. Las variables implicadas en el cálculo son unidimensionales (características constantes en cada sección) bajo la hipótesis de un gas ideal.

Para cada disposición de ventiladores estudiada (número y posición) se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se sitúa el incendio en un punto. La posición del incendio se determina relativa a la boca de entrada, en cada iteración se traslada la posición del incendio recorriendo desde la mitad del túnel hasta la salida en intervalos de 5% de la longitud del túnel. Únicamente se analiza desde la mitad del túnel en lugar de todo el túnel, al ser un túnel bidireccional, y considerando que los ventiladores se colocarán en ambas mitades de forma simétrica y serán 100% reversibles en su operación.
2. Se calculan todos los términos de pérdidas de carga, teniendo en cuenta la variación de densidad y temperatura del aire en cada punto del túnel, provocado por el incendio en cada posición estudiada.
3. Se calcula el empuje proporcionado por cada ventilador teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas y geométricas de su posición.
4. Se compara, en términos de presión, el empuje proporcionado por los ventiladores y las pérdidas creadas por una corriente de aire a la velocidad de diseño. Si el primero es mayor, el sistema tiene fuerza suficiente y la velocidad conseguida será mayor que la velocidad de diseño, si es menor, se considera no válido.
5. El cálculo se repite cambiando la posición del incendio y recorriendo así todo el túnel. Si el sistema se muestra insuficiente en una sola posición de incendio, la disposición estudiada es desechada.

El número final de ventiladores de cada tramo, como se ha mencionado anteriormente, será el necesario para hacer frente a todas las posiciones de incendio, considerando simultáneamente las pérdidas de carga generadas y el rendimiento de cada uno de los

equipos, el cual varía según su posición en el túnel, debido a la variación de la densidad del aire.

Los cálculos se realizan mediante la programación de todas las fórmulas, que se explicarán en los posteriores puntos, en Microsoft Excel. Este entorno permite la introducción de los datos del túnel y de los equipos de forma sencilla y, al mismo tiempo, realizar iterativamente cientos de cálculos que sería imposible realizar sin una herramienta informática. Asimismo, facilita la representación e interpretación de los resultados mediante gráficas.

Los parámetros utilizados para modelar el problema de forma unidimensional (coeficiente de fricción de las paredes del túnel, pérdidas de carga provocadas por el incendio, perfil de temperatura a lo largo del túnel, rendimiento de los ventiladores, etc.) están en concordancia con las recomendaciones dadas por el CETU y PIARC.

2. Verificación del dimensionamiento y modificación del mismo en caso de ser necesario, mediante la simulación unidimensional del túnel con el software CAMATT.

El objetivo de esta fase es comprobar el dimensionamiento realizado, donde la simplificación en la formulación tenida en cuenta (véase 3.3.5.6.1) puede llevar a diferencias significativas.

Para calcular la evolución de la masa de humo y de los parámetros que la definen a lo largo del túnel, en función del tiempo, se ha utilizado el software CAMATT (Cálculo Monodimensionnel Anisotherme Transitoire en Tunnel), desarrollado por el CETU, que modeliza el incendio con un análisis unidimensional. Este modelo resuelve las ecuaciones de la mecánica de fluidos en el supuesto de que los parámetros físicos (velocidad, temperatura, presión, concentración ...) sean constantes en la sección transversal.

La construcción del modelo unidimensional se realiza según las instrucciones contenidas en el *User's Guide CAMATT 2.20 de noviembre de 2011, capítulo 2. Usando CAMATT 2.20* [25], en el que se explican detalladamente los pasos a seguir para generar la geometría

unidimensional, emplazar y caracterizar el foco y los ventiladores de chorro e imponer condiciones de contorno en los límites.

Se ha analizado con las simulaciones unidimensionales la posición de incendio más desfavorable determinada en la fase 1 de dimensionamiento, donde se analizan todas las posiciones de incendio posibles dentro del túnel con el fin detectar el punto más vulnerable.

3.3.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN SANITARIA O DE CONFORT

3.3.4.1 CONCEPTOS GENERALES

El objetivo del sistema de ventilación en situación normal de servicio es garantizar que el aire del túnel mantenga unas condiciones adecuadas de confort y seguridad para los usuarios; asegurando la dilución de los contaminantes de los vehículos hasta los límites admisibles, y permitiendo una capacidad de reacción adecuada en caso de una rápida demanda de flujo.

Estudios anteriores solían considerar solo el monóxido de carbono (CO) como contaminante a mantener en valores aceptables, ya que el flujo de aire necesario sería suficiente para los demás contaminantes. Sin embargo, debido a los incrementos progresivos de los vehículos diésel, así como al mayor conocimiento de los efectos nocivos del dióxido de nitrógeno (NO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) son cada vez más importantes en el dimensionamiento del sistema de ventilación en modo de funcionamiento normal. El tercer factor a considerar para el sistema de ventilación en modo de operación normal (además de la concentración de CO y NO_x) es la disminución de la visibilidad en el túnel debido al humo generado en el proceso de combustión y la emisión de partículas.

En un túnel con ventilación longitudinal, como el presente caso, los contaminantes son barridos desde la boca de entrada hasta la boca de salida. En consecuencia, la concentración va aumentando hasta el valor máximo obtenido en la boca de salida. El equipo de ventilación requerido se calcula para proporcionar este flujo de aire requerido

en cada situación de tráfico teniendo en cuenta las diferentes pérdidas que pueden aparecer en el túnel como pérdidas por fricción o empuje del vehículo.

La metodología de diseño se basa en el cálculo de las pérdidas debidas a los diferentes efectos que se pueden encontrar durante una operación normal en el túnel y el empuje real obtenido de los ventiladores tipo jet fan a instalar.

Durante la operación normal de la infraestructura, los efectos climáticos junto con el efecto pistón de los turismos puede ser suficiente en la gran mayoría de casos para mantener unas condiciones de calidad de aire aceptables en el interior del túnel.

3.3.4.2 LÍMITES DE CONTAMINANTES EN INTERIOR DE TÚNELES

Aunque las normas de calidad de aire establecen el control de múltiples contaminantes principalmente dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), ozono troposférico, monóxido de carbono (CO), benceno y partículas en suspensión (PM10 y PM2.5), según las recomendaciones internacionales, los contaminantes que se deben analizar en el entorno de un túnel son principalmente NO₂, CO y las partículas en suspensión (opacidad). Para estos contaminantes, existen varias normativas o guías que fijan límites recomendables. A continuación, se resumen los niveles exigidos por la PIARC:

Tabla 3.5. Niveles límites recomendables. Fuente: elaboración propia a partir de informe de la PIARC [12]

Situación de tráfico	Opacidad (m ⁻¹)	CO (ppm)
Tráfico fluido máximo 50-100 km/h	0,005	70
Tráfico frecuentemente congestionado, parados en todos los carriles	0,007	70
Tráfico congestionado de forma excepcional, parados en todos los carriles	0,009	90
Valor límite de cierre de túnel	0,012	200

Respecto al óxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), son contaminantes generados durante el proceso de combustión. La mayoría de los óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos corresponden al NO, el cual se oxida en presencia del oxígeno hasta convertirse

Para la estimación del tráfico futuro que circulará por los túneles se ha analizado la tendencia histórica del tráfico y su distribución.

Se muestra a continuación el resumen de los datos históricos de IMD y porcentaje de vehículos pesados entre los años 1989 y 2019 (últimos datos registrados, correspondientes a la estación L-32-1):

Tabla 3.6. Datos históricos de IMD y veh. Pesados (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Mapa de Tráfico del MITMA [22]).

Año	IMD (veh/d)			%VP
	Total	Ligeros	Veh. Pesados	
2019	1.648	1.568	80	4,85%
2018	1.657	1.550	107	6,46%
2017	1.494	1.379	115	7,70%
2016	1.484	1.422	62	4,20%
2015	1.399	1.296	103	7,36%
2014	1.433	1.328	105	7,20%
2013	1.358	1.281	77	5,46%
2012	1.527	1.445	82	5,27%
2011	1.654	1558	96	5,67%
2010	1.586	1.494	92	5,74%
2009	1.774	1.648	126	7,04%
2008	1.611	1.486	125	7,68%
2007	1.966	1.802	164	8,22%
2006	1.617	1.540	77	4,72%
2005	1.588	1.523	65	4,05%
2004	1.469	1.402	67	4,51%
2003	1.462	1.379	83	5,61%
2002	1.669	1.603	66	3,91%
2001	1.720	1626	94	5,40%
2000	1.532	1.428	104	6,68%
1999	1.681	1.601	80	4,69%
1998	1.472	1.360	112	7,53%
1997	1.654	1.629	25	1,50%
1996	1.553	1.470	83	5,30%
1995	1.370	1.297	73	5,28%
1994	1.171	1.080	91	7,64%
1993	1.227	1.098	129	10,45%
1992	884	836	48	5,39%
1991	957	871	86	8,92%
1990	844	751	93	10,69%
1989	931	846	85	9,04%

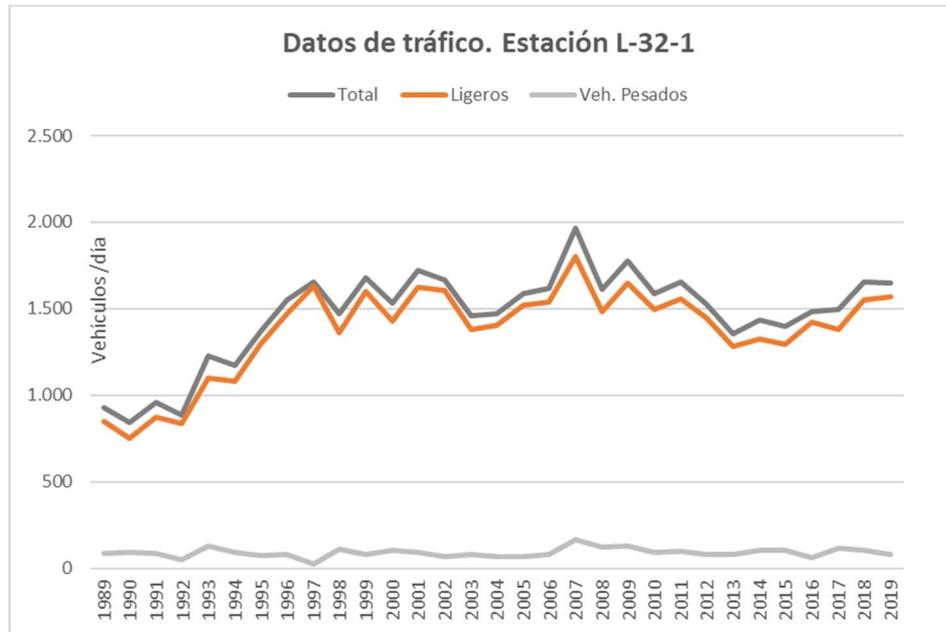


Figura 3.7. Datos históricos de tráfico estación L-32-1. Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos históricos, se calcula la previsión del volumen y distribución del tráfico en los próximos 20 años. Si la estimación se realiza con todos los valores registrados, se obtiene una tendencia ascendente en el tiempo. En cambio, analizando los valores, se observa que, a partir del año 1996, se estabiliza la IMD en torno a valores comprendidos entre 1.400-1.800 veh/día.

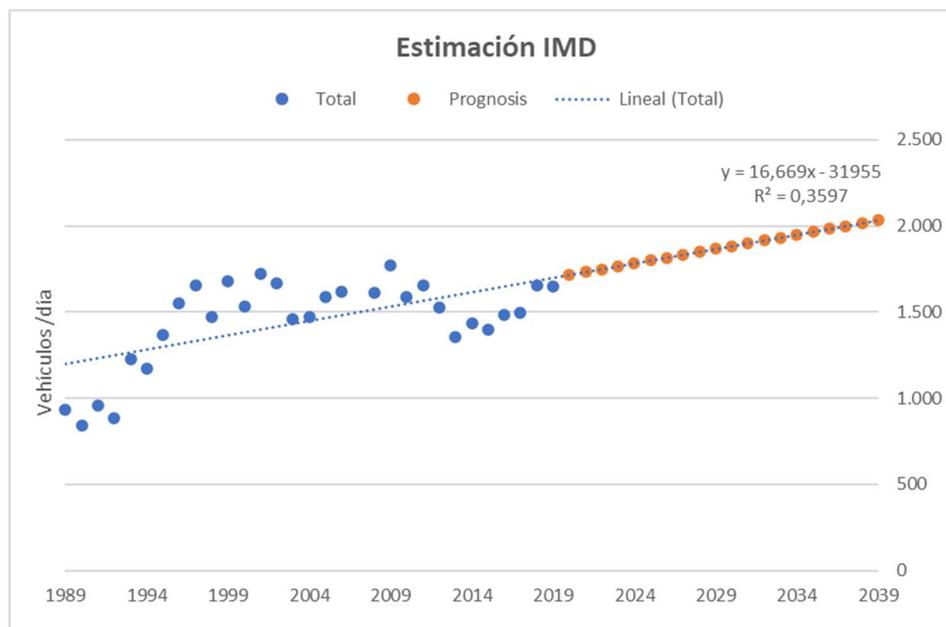


Figura 3.8. Estimación del tráfico. Fuente: elaboración propia.

En lo que respecta al tanto por ciento de vehículos pesados, como se puede observar en la Figura 3.9, la tendencia es descendente, si bien es cierto que debido a la alta variabilidad de los valores a lo largo de los años resulta difícil obtener una estimación fiable (coeficiente de determinación, R^2 próximo a 0), incluso eliminando de la estimación aquellos valores atípicos (outliners), que se separan con mayor distancia de la línea de tendencia.

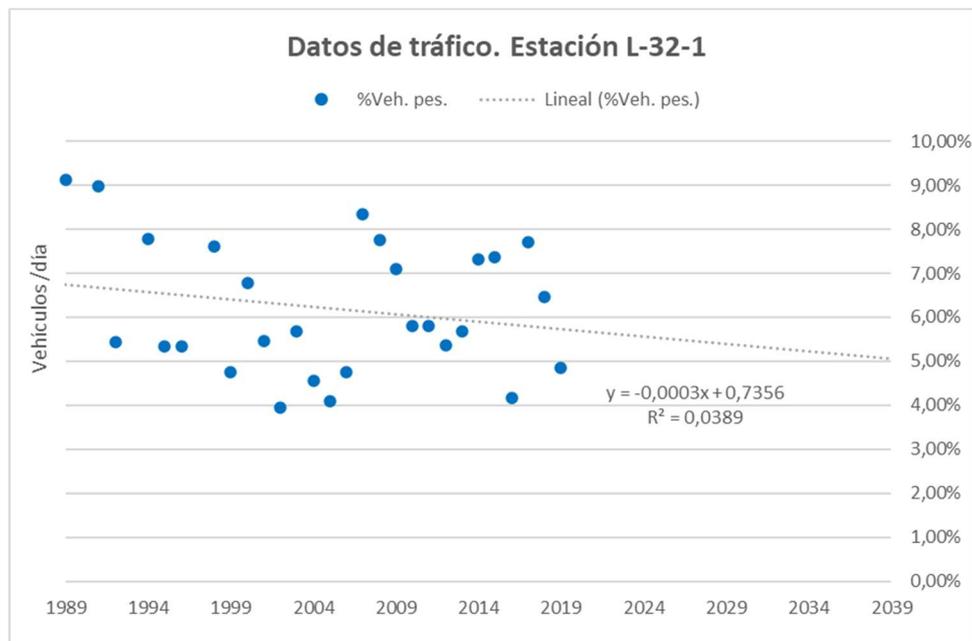


Figura 3.9. Análisis de tráfico de veh. pesados. Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, debido a lo anteriormente explicado, y la tendencia estable de los últimos 20 años se decide establecer para todos los cálculos posteriores a realizar, el último valor disponible de la estación L-32-1, tanto para la IMD, como para el tanto por ciento de vehículos pesados.

Por otro lado, dicha estación de tráfico no refleja la variación a lo largo del día del número de vehículos, por lo que se debe calcular la intensidad de tráfico en hora punta a partir del IMD y del factor K, que indica la proporción de IMD que ocurre durante la hora punta. Dichos parámetros se han calculado en el apartado 3.2.2.

Como se indica posteriormente, para el cálculo de emisiones de los vehículos, se requiere de la composición de los vehículos que atraviesan el túnel, en función de la siguiente tipología: vehículos ligeros, vehículos ligeros comerciales y vehículos pesados, y el sistema

de propulsión de cada uno de ellos. A falta de dichos datos, los cuales no se presentan en las estaciones de tráfico más próximas al túnel, se ha obtenido el número de vehículos disponibles en la provincia de Lérida, extraídos de la *Base de datos del Observatorio del transporte y la logística en España del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Parque nacional de vehículos por comunidad autónoma, provincia, tipo de vehículo y tipo de carburante* [26]

De acuerdo a estos valores se ha considerado en los cálculos el reparto de vehículos que se indica en la siguiente tabla:

Tabla 3.7. Composición de tráfico. Fuente: elaboración propia.

Tipo de vehículo		
Uso	Motor	%Proporción
Vehículos ligeros (VL)	Total	90,15%
	Gasolina (% del total VL)	40,09%
	Diésel (% del total VL)	59,91%
Vehículos ligeros comerciales (VLC)	Total	5,00
	Gasolina (% del total VLC)	30,15%
	Diésel (% del total VLC)	69,85%
Vehículos pesados (VP)	Diésel	4,85%

En conclusión, a continuación, se resumen los datos de tráfico establecidos y que servirán de base para los posteriores cálculos:

Tabla 3.8. Resumen. Datos de tráfico

IMD	1.648 veh/d
%VL:	90,15%
%VLC:	5,00%
%VP:	4,85%
IHP:	181 veh/h punta
IHP sentido 1:	100 veh/h punta
IHP sentido 2	81 veh/h punta

3.3.4.4 EMISIONES DE CONTAMINANTES DE VEHÍCULOS

Para las emisiones de contaminantes generados por los vehículos (CO, NOx, y PM), así como las correspondientes a las emisiones de partículas no provenientes de los procesos de combustión, se han empleado las tablas recogidas en el documento técnico “*Túneles de carretera: emisiones de vehículos y demanda de ventilación*” del año 2019 de la PIARC [12], considerando la siguiente flota de vehículos correspondiente a un país europeo:

Tabla 3.9. Parque automovilístico considerado

Parque automovilístico Europa (2018)							
Tipo	pre EU1	EU1	EU2	EU3	EU4	EU5	EU6
VL gasolina	2,20%	2,30%	2,60%	2,10%	17,00%	35,70%	38,20%
VL diésel	0,20%	1,30%	2,20%	5,90%	16,80%	36,00%	37,50%
VLC gasolina	5,70%	3,30%	2,40%	4,30%	15,90%	29,70%	38,90%
VLC diésel	1,70%	1,70%	3,00%	8,30%	20,50%	33,60%	31,10%
VP diésel	0,80%	0,60%	1,60%	4,90%	3,10%	29,20%	59,80%

Siendo:

- VP gasolina: vehículos particulares de gasolina.
- VP diésel: vehículos particulares diésel.
- VLC gasolina: vehículos comerciales ligeros de gasolina.
- VLC diésel: vehículos comerciales ligeros diésel.
- VP diésel: vehículos pesados diésel.

Hay que destacar que estos valores se basan en unos estándares generales de composición de vehículos y suele presentar valores para el diseño elevados (las emisiones de todos los vehículos las suele considerar como el valor máximo permitido por la ley, cuando en la realidad una gran parte de los vehículos no alcanza el valor máximo permitido y muy pocos los superan).

Para determinar el valor de las emisiones equivalentes por vehículo, hay que aplicar sobre las emisiones base, unos coeficientes correctores que consideren otros fenómenos, y que son distintos para los vehículos ligeros y pesados, según se detalla a continuación:

- Factor de tiempo (Ft): considera la renovación del parque automovilístico:

Este factor afecta a todos los tipos de vehículos, como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 3.10. Factor de tiempo para VL

ft	CO		NOx		Opacidad	
VL	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel
2018	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2020	0,91	0,92	0,85	0,87	0,98	0,76
2025	0,78	0,80	0,62	0,51	0,95	0,44
2030	0,71	0,74	0,50	0,32	0,93	0,33
2035	0,69	0,72	0,46	0,26	0,92	0,31

Tabla 3.11. Factor de tiempo para VLC

ft	CO		NOx		Opacidad	
VLC	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel
2018	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2020	0,80	0,77	0,70	0,82	0,92	0,75
2025	0,57	0,43	0,32	0,49	0,82	0,38
2030	0,49	0,26	0,20	0,34	0,79	0,21
2035	0,48	0,25	0,19	0,29	0,78	0,17

Tabla 3.12. Factor de tiempo para VP

ft	CO	NOx	Opacidad
VP	Diésel	Diésel	Diésel
2018	1,00	1,00	1,00
2020	0,89	0,71	0,96
2025	0,76	0,34	0,92
2030	0,72	0,22	0,91
2035	0,72	0,22	0,91

- Factor de altitud (Fh)

Para altitudes inferiores a 1.000 m sobre el nivel del mar, no hay influencia para ningún tipo de vehículos. Estableciendo, por tanto, el factor igual a 1,0 para los cálculos desarrollados.

– Factor de masa

Se aplica un factor corrector cuando la flota media de vehículos pesados es más ligera, o más pesada a 23 T. Para este caso en concreto, a falta de datos específicos, se considera que los vehículos pesados son de una masa de 23 T, por lo que se aplica un factor igual a 1,0 para los cálculos desarrollados.

– Emisiones no procedentes de la combustión.

Las emisiones no procedentes de la combustión se deben aplicar a todos los sistemas de propulsión. Las partículas sólidas pueden incorporarse al aire del túnel como consecuencia del desgaste de los frenos y los neumáticos y la reentrada de polvo en suspensión. Se incluye en la Tabla 3.13, los valores para tener en cuenta en el cálculo resultante de opacidad. Se presenta en función de la velocidad, tipo de circulación en el túnel, y tipo de vehículo:

Tabla 3.13. Emisiones no procedentes de la combustión

Emisiones no procedentes de la combustión (m ² /h)				
Velocidad (km/h)	VL y VLC		VP	
	Bidireccional	Unidireccional	Bidireccional	Unidireccional
0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,10	0,70	5,10	4,40
20	2,20	1,30	10,10	8,80
30	3,40	2,00	15,20	13,30
40	4,50	2,60	20,20	17,70
50	5,60	3,30	25,30	22,10
60	6,70	3,90	30,30	26,50
70	7,80	4,60	35,40	30,90
80	9,00	5,30	40,40	35,30
90	10,10	5,90	45,50	39,80
100	11,20	6,60	50,60	44,20
110	12,30	7,20	-	-
120	13,40	7,90	-	-
130	14,60	8,60	-	-

– Caudales de ventilación

El caudal necesario para la dilución de contaminantes se calcula como la división de la tasa de generación de contaminantes total entre la variación de la concentración admisible del contaminante.

En la siguiente tabla se indican los límites admisibles de contaminantes establecidos para el túnel de Erinyà.

Tabla 3.14. Valores admisibles de contaminantes

Contaminante	Valor admisible
C _{adm} , CO	70 ppm o 81,270 mg/m ³
C _{adm} , NO ₂	1 ppm o 1.906,89 µg/m ³
C _{adm} , Visibilidad (opacidad)	0,005 m ⁻¹ o 1.063,83 µg/m ³

Se tomarán estos valores límite de gases contaminantes como base para la realización de los cálculos y la obtención de los caudales necesarios de ventilación en nivel de servicio.

La formulación y procedimientos utilizados, que a continuación se detallan, se han extraído del propio informe de la PIARC, ya mencionado al comienzo del presente punto [12].

La tasa de emisión en la sección del túnel (G_{tunnel}), se calcula como el sumatorio de las tasas de emisión corregidas para cada categoría de vehículo (g_{corr}), ponderada por el número de vehículos de cada categoría existente (n_{veh}). Como se ha indicado anteriormente, las tasas de emisión corregidas se obtienen a partir de la tasa de emisión base para cada tipo de vehículo, teniendo en cuenta los años del vehículo, la pendiente del túnel, y los factores correctores.

$$G_{tunnel} = \sum_{i=1}^{N_{categoria}} g_{corr,i} * n_{veh,i} \quad (3.4)$$

Ecuación 3.4. Tasa de emisión en la sección del túnel

El cálculo del caudal necesario para la dilución de contaminantes se expresa con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{G_{tunnel}}{C_{adm} - C_{amb}} \quad (3.5)$$

Ecuación 3.5. Caudal necesario

Siendo:

- Q= Caudal necesario de aire exterior (m^3/s)
- G_{tunnel} =Tasa de generación de emisiones del contaminante a lo largo del túnel, [g/s] para gases, [m^2/s] para visibilidad.
- C_{adm} = Concentración admisible de contaminante [g/m^3]
- C_{amb} = Concentración de contaminante en el ambiente exterior [g/m^3]
- K_{adm} = Nivel admisible del coeficiente de extinción (visibilidad) [m^{-1}]
- K_{amb} = Nivel de fondo del ambiente exterior del coeficiente de extinción (visibilidad) [m^{-1}].

En el caso de la visibilidad, se emplea la misma fórmula, sustituyendo la concentración C por el coeficiente de extinción K.

3.3.4.5 RESULTADOS OBTENIDOS

Se presenta en la Tabla 3.15 la composición de tráfico en función de la velocidad de circulación:

Tabla 3.15. Composición del tráfico en función de la velocidad. Fuente: elaboración propia

v(km/h)	veh/c*km	Número de vehículos (n veh,i)				
		VLG	VLD	VLCG	VLCD	VP
0	189	43	64	2	2	6
10	36	4	6	0	0	1
20	18	2	3	0	0	0
30	12	1	2	0	0	0
40	9	1	2	0	0	0
50	7	1	1	0	0	0
60	6	1	1	0	0	0
70	5	1	1	0	0	0
80	5	1	1	0	0	0
90	4	0	1	0	0	0
100	4	0	1	0	0	0
110	3	0	1	0	0	0
120	3	0	1	0	0	0
130	3	0	1	0	0	0

Debido a que es un túnel con una intensidad de tráfico diaria muy baja, se puede visualizar en la tabla que a partir de la velocidad de 50 km/h, simultáneamente no se alcanzaría ni un vehículo ligero.

Para los valores límite de contaminantes recomendados por PIARC en el interior de los túneles, se obtienen los siguientes resultados de emisiones, en función de la velocidad de circulación:

Tabla 3.16. Emisiones en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia

v(km/h)	Emisiones CO (g/h/veh)					Emisiones NOx (g/h/veh)					Emisiones opacidad y otras partículas (m ² /h/veh)				
	VLG	VLD	VLCG	VLCD	VP	VLG	VLD	VLCG	VLCD	VP	VLG	VLD	VLCG	VLCD	VP
0	4,94	0,28	3,86	0,31	3,38	0,17	3,91	0,28	3,13	10,18	0,00	0,30	0,00	0,45	1,80
10	11,07	1,44	40,60	1,26	21,75	1,75	12,68	3,03	9,43	65,72	1,25	2,36	1,21	3,31	12,20
20	21,36	3,05	47,30	1,48	23,54	2,47	16,22	4,43	13,54	70,01	2,39	3,76	2,37	5,08	17,54
30	16,04	2,80	54,00	1,71	27,54	2,93	19,75	5,67	17,32	73,13	3,63	5,16	3,64	6,96	23,67
40	20,88	2,53	70,53	1,81	33,68	3,56	22,77	6,47	20,23	84,99	4,78	6,68	4,93	8,59	30,84
50	22,16	2,39	73,75	1,91	39,06	3,73	25,78	7,07	22,94	93,02	5,91	8,20	5,99	10,22	37,37
60	23,71	2,25	76,98	2,11	47,81	4,42	31,23	8,63	31,99	130,93	7,12	9,60	7,25	12,22	44,86
70	34,40	1,97	104,44	2,32	56,39	5,11	38,71	10,32	41,04	168,85	8,33	11,08	8,96	15,18	52,44
80	47,30	1,90	136,60	2,54	65,39	6,38	50,60	13,40	63,59	206,76	9,81	13,11	10,96	18,28	60,19
90	65,31	1,76	204,53	2,75	67,70	8,51	62,43	16,47	86,01	212,63	11,28	15,13	13,16	21,11	67,54
100	84,18	1,46	290,15	3,06	69,99	10,41	77,19	19,43	102,51	219,64	12,72	17,08	16,19	23,66	73,95
110	144,01	1,39	534,70	3,44	69,99	12,00	102,00	22,90	130,35	219,64	14,37	19,12	19,34	26,61	23,35
120	253,28	1,64	998,65	4,20	69,99	14,11	128,07	25,03	159,52	219,64	16,70	20,81	22,55	29,58	23,35
130	498,29	1,89	1.997,70	4,69	69,99	17,07	170,64	25,45	185,35	219,64	20,45	23,12	28,04	32,75	23,35

Se presenta en la siguiente tabla, la demanda de aire máxima para diluir los contaminantes generados en el interior del túnel:

Tabla 3.17. Demanda de aire para diluir los contaminantes. Fuente: elaboración propia

Demanda de aire para diluir contaminantes (m ³ /s)				Velocidad (m/s)	Presión requerida (Pa)
CO	NOx	Opacidad	Máximo		
0,88	47,37	1,73	47,37	0,65	0,26
0,26	21,68	1,74	21,68	0,30	0,05
0,18	7,81	0,89	7,81	0,11	0,01
0,07	6,18	0,77	6,18	0,08	0,00
0,09	7,15	1,01	7,15	0,10	0,01
0,08	4,30	0,78	4,30	0,06	0,00
0,09	5,19	0,93	5,19	0,07	0,00
0,12	6,38	1,08	6,38	0,09	0,00
0,17	8,30	1,27	8,30	0,11	0,01
0,01	9,09	0,84	9,09	0,12	0,01
0,01	11,24	0,95	11,24	0,15	0,01
0,00	14,86	1,06	14,86	0,20	0,03
0,01	18,66	1,16	18,66	0,26	0,04
0,01	24,86	1,28	24,86	0,34	0,07

Como se puede observar en la Tabla 3.17, se ha calculado la velocidad del aire necesaria para diluir las concentraciones de contaminantes en todo el rango de velocidades de circulación, a partir del máximo caudal de dilución de los contaminantes considerados dividiéndolo entre la sección del túnel.

A continuación, se puede visualizar de manera gráfica, que la demanda de aire requerida para el túnel de Erinyà, se debe principalmente a las emisiones de NOx.

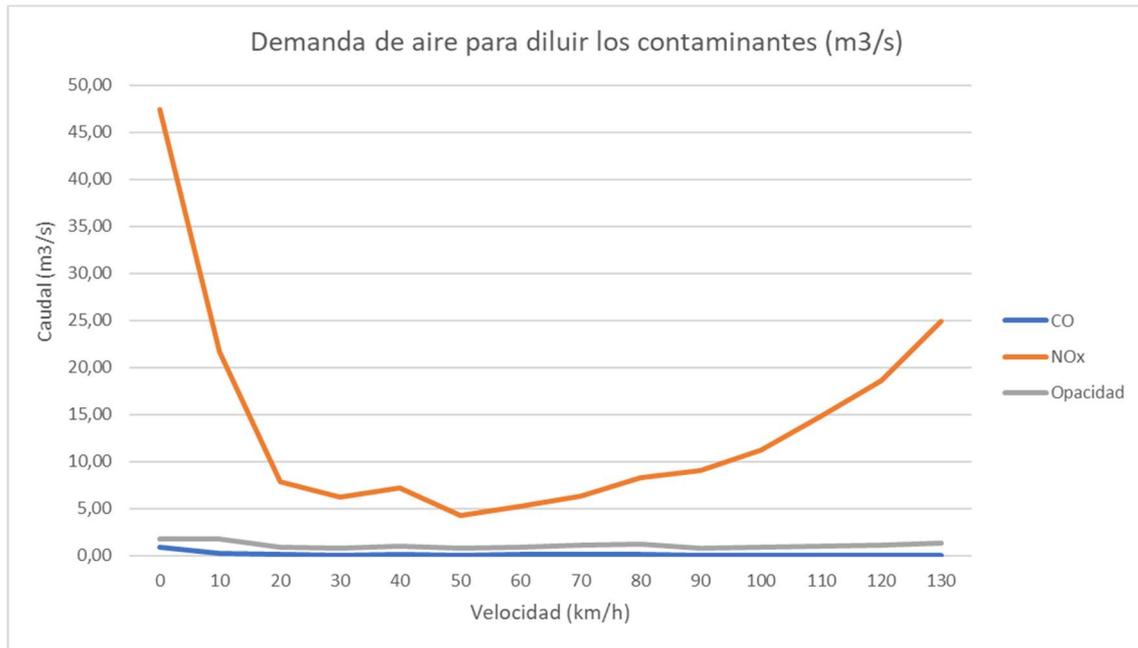


Figura 3.10. Demanda de aire de cada contaminante. Fuente: elaboración propia.

Respecto a los bajos niveles de emisiones de CO y partículas en suspensión, tiene su explicación, debido a que es un túnel con una intensidad de tráfico baja (<2.000 veh/d), y un tanto por ciento de vehículos pesados relativamente bajo también (<5,00%), donde predominan los vehículos de motor diésel.

A partir de la presión requerida, se analiza para cada velocidad de circulación la necesidad de disponer de ventilación para situación normal de operación. Poniéndonos del lado de la seguridad, se considera para este cálculo que no hay influencia del viento exterior en la corriente de aire en el interior del túnel.

Se analiza si con el empuje generado por los vehículos resulta suficiente, para mantener unas condiciones de calidad de aire aceptables. Se presentan en la siguiente tabla, los valores de presión que genera el efecto pistón de los vehículos en el interior del túnel y las necesidades de ventilación debido a los contaminantes generados, en función de la velocidad de circulación.

Tabla 3.18. Presión ejercida y requerida en condiciones normales de operación. Fuente: elaboración propia.

V (km/h)	V (m/s)	Vnec conta. (m/s)	Dp veh. (Pa)	Presión requerida (Pa)	nº de vent. (uds)
0	0,00	0,65	0,00	0,26	1
10	2,78	0,30	-0,04	0,05	1
20	5,56	0,11	0,08	0,01	0
30	8,33	0,08	0,23	0,00	0
40	11,11	0,10	0,42	0,01	0
50	13,89	0,06	0,73	0,00	0
60	16,67	0,07	1,04	0,00	0
70	19,44	0,09	1,41	0,00	0
80	22,22	0,11	1,82	0,01	0
90	25,00	0,12	2,31	0,01	0
100	27,78	0,15	2,82	0,01	0
110	30,56	0,20	3,33	0,03	0
120	33,33	0,26	3,87	0,04	0
130	36,11	0,34	4,35	0,07	0



Figura 3.11. Requisitos nivel de servicio. Efecto pistón y nº de ventiladores. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, no existe ningún requisito para disponer de ventilación sanitaria mecánica en situaciones de tráfico de flujo libre (> 20 km/h). Por lo tanto, la demanda de ventiladores tipo jet fans solo será necesaria en casos de tráfico de vehículos congestionado o parado. A partir de estas consideraciones, la cantidad total que se obtiene es de 1

ventilador para las necesidades de ventilación sanitaria en el túnel de Erinyà, en dichas condiciones.

3.3.5 DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN EN CASO DE INCENDIO

3.3.5.1 INTRODUCCIÓN

Para el estudio del sistema de ventilación en caso de incendio, se han realizado los siguientes cálculos y tomado las siguientes decisiones:

1. Cálculo de la velocidad crítica para estimar en todos los casos el empuje necesario (igual en todos los casos debido a que depende de la potencia del incendio y de la geometría del túnel).
2. Selección de la curva de potencia de incendio de diseño.
3. Cálculo del empuje necesario para estimar el escenario más desfavorable y una estimación del número de ventiladores necesarios.
4. Simulación mediante modelos unidimensionales (a través del software CAMATT) del comportamiento del humo con los ventiladores necesarios obtenidos en el apartado 3.3.5.6.2, en la posición más desfavorable.

3.3.5.2 VELOCIDAD CRÍTICA

La velocidad crítica se define como la velocidad de aire a la cual todo el humo es desplazado en la dirección del aire y por tanto previene el retroceso de los humos (backlayering) asegurando un camino de evacuación aguas arriba del incendio libre de humo.

El primer concepto de velocidad crítica parte de Thomas en el año 1968, quien comparó la cabeza de flotación del flujo de humo y la velocidad del flujo de aire fresco. Bajo esta comparación definió el número crítico de Froude.

Kennedy en 1996, basándose en una teoría similar propuso la siguiente ecuación para su aplicación en túneles, introduciendo el concepto de túnel con pendiente:

$$Tf = \frac{Qc}{\rho_o * Cp * A * Vc} + T_o$$

$$Frc = 4,5 * (1 + 0.0374 * i^{0.8})^{-3}$$

$$Vc = 0,606 * Kg * \left(\frac{g * Qc * H}{\rho_o * Cp * A * Tf} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.6)$$

Ecuación 3.6. Velocidad crítica (Kennedy)

Siendo:

- g : gravedad igual a 9,81 m/s²
- Qc : Potencia de incendio convectiva (W) estimada en 2/3 de la potencia total.
- H : Altura del túnel (m)
- ρ_o : Densidad del aire limpio (kg/m³)
- Cp : Calor Específico (kJ/kg K)
- Tf : Temperatura máxima en el foco del incendio (K)
- A : Sección del túnel (m²)
- Kg : coeficiente dependiente de la pendiente e igual a número de Froude elevado a (-1/3).
- Frc : Número de Froude crítico.
- I : Pendiente del túnel cuando se ventila en sentido contrario a la pendiente.
- Vc : Velocidad crítica (m/s)
- T_o : Temperatura ambiente (K)

Paralelamente han ido apareciendo estudios alternativos que determinaban que la fórmula de Kennedy no prevenía completamente el Backlayering, como puede ser Oka and Atkinson, Wu and Bakar y posteriormente Li o las fórmulas previstas en la NFPA 502 [19]. Sin embargo, la fórmula de Kennedy es la más conservadora en cuanto a la velocidad crítica y la expresión más utilizada en el dimensionamiento de los sistemas de ventilación. Se utiliza, por tanto, la fórmula de Kennedy para el dimensionamiento preliminar de la ventilación de emergencia (en caso de incendio) del túnel de Erinyà.

Se presenta en la siguiente gráfica, la variación de la velocidad crítica en función de la potencia de incendio, aplicando la fórmula de Kennedy.

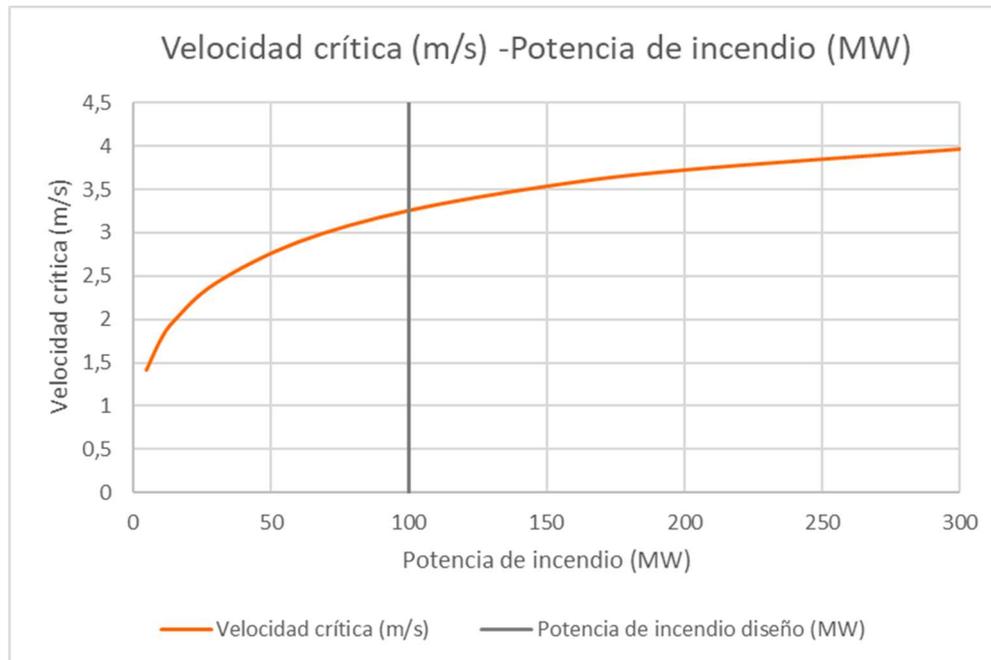


Figura 3.12. Relación entre la potencia de incendio y la velocidad crítica. Modelo Kennedy. Fuente: elaboración propia.

La velocidad crítica depende de las condiciones geométricas del túnel y de la potencia del incendio, por lo que no depende de los ventiladores que se instalan.

Se presenta en la Tabla 3.19 los datos de partida y la velocidad crítica obtenida para la potencia de incendio de diseño (100 MW), resultando **2,797 m/s**.

Tabla 3.19. Velocidad crítica para potencia de incendio 100 MW. Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la velocidad crítica (Vcr)	
Velocidad crítica supuesto-[Vc] (m/s)	3,00
Potencia de incendio convectiva [QC] (W)	6,67E+07
Altura del túnel [H] (m)	7,39
Densidad aire inicial [po] (kg/m ³)	1,20
Calor específico del aire - [Cp] (J/kgK)	1.004,67
Área del túnel -[A] (m ²)	72,75
Pendiente [i] (%)	0,02
Coficiente de pendiente [Kg]	1,00
Nº de Froude crítico	4,48

Cálculo de la velocidad crítica (Vcr)		
Coeficiente por potencia [k1]		0,61
Temperatura ambiente [To] (°C)		293,00
Temperatura de las llamas [Tf] (K)		545,33
Aceleración de la gravedad -[g] (m/s ²)		9,81
Velocidad crítica [Vcr] (m/s) 1ª iteración		2,83
2ª iteración	Tf (K)	560,77
	Vcr (m/s)	2,801
3ª iteración	Tf (K)	563,28
	Vcr (m/s)	2,797
4ª iteración	Tf (K)	563,28
	Vcr (m/s)	2,797

3.3.5.3 ESTRATEGIA DE VENTILACIÓN

La ventilación del túnel se logrará por medios naturales o mecánicos, dependiendo de las condiciones del túnel en términos de efecto de pistón de vehículos en movimiento, viento externo y diferenciales de temperatura y presión entre los portales.

Como se ha podido estudiar en el punto/apartado 3.3.4, la ventilación natural puede ser suficiente para la operación normal, cuando el flujo de aire generado por los vehículos en movimiento proporciona suficiente ventilación para mantener una calidad de aire aceptable.

Sin embargo, cuando sea necesario, la activación de los ventiladores de chorro del túnel se utilizará para producir suficiente flujo de aire para diluir los contaminantes a un nivel admisible durante el funcionamiento normal.

Durante una operación de emergencia, se necesita ventilación para influir en el flujo de humo y los productos de combustión, con el fin de crear un entorno seguro que permita al usuario del túnel escapar con seguridad, y permita que intervengan los SSEE.

De lo anteriormente descrito, se puede extraer que la mejor estrategia de ventilación en túneles bidireccionales donde puede haber presencia de vehículos a ambos lados del incendio, es ventilar a bajas velocidades (1-1,5 m/s) con los ventiladores más alejados del

foco del incendio para garantizar la máxima estratificación posible durante el proceso de evacuación. Una vez que la evacuación queda garantizada se puede elevar la ventilación a petición de los servicios de emergencia para lograr un camino libre de humos hasta el lugar del incendio (velocidad crítica).

Esta estrategia va en consonancia con lo que expone PIARC en su documento “Operational Strategies for Emergency Ventilation” [13], tal y como se ha explicado en el 2.2.3.3.1, donde se indica que para túneles bidireccionales lo mejor es mantener la velocidad de aire en el interior del túnel en el orden de 1 a 1,5 m/s para garantizar la evacuación en ambos sentidos. Sin embargo, si el control de la velocidad longitudinal no es fiable, PIARC recoge la posibilidad de no activar la ventilación mecánica.

En caso de emergencia, es fundamental poder realizar la gestión de la ventilación, de tal manera que se pueda conseguir que el lado por el que puedan entrar los Servicios de Emergencia (bomberos, servicios sanitarios, personal de primera intervención, etc) esté libre de humo.

Respecto a la estrategia de ventilación longitudinal en túneles bidireccionales, la normativa francesa indica lo siguiente en el apartado 3.2.2 - *Ventilation de désenfumage en cas d'incendie, ANNEXE N° 2 de la «Circulaire interministérielle n° 2000- 63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national»* [27]

“a) Requisitos para la extracción de humos en ventilación longitudinal Principio y dimensionamiento.

El principio de este tipo de extracción de humos consiste en empujar el humo hacia la salida de un túnel. El sistema debe ser capaz de asegurar una velocidad media del flujo de aire de al menos 3 m/s en el tramo de túnel aguas arriba del incendio.

En túneles de dos vías, el sistema debe ser capaz de asegurar la velocidad del flujo de aire especificada anteriormente en ambas direcciones. Sin embargo, si los servicios de emergencia pueden llegar a los dos extremos con la misma rapidez, será suficiente para que el sistema asegure la velocidad anterior en la dirección en la que sea más fácil alcanzarla.

La velocidad de dimensionamiento deberá ser susceptible de ser alcanzada con vehículos detenidos en el túnel, cuyo número dependerá del tiempo de cierre en caso de incendio.

Excepto en los túneles de dos vías en los que la velocidad especificada sólo debe alcanzarse en la dirección en que sea más fácil alcanzarla, el efecto "chimenea" que hace que el humo suba hacia el extremo superior del túnel si no está horizontal debe tenerse en cuenta cuando sea desfavorable, así como los efectos atmosféricos que sean favorables pero no excepcionales."

En el caso del túnel de Erinyà, se analizará el caso más desfavorable, estableciendo las condiciones atmosféricas y el efecto chimenea resultante en contra del sentido de impulsión del aire aportado por los ventiladores necesarios, considerando que los SSEE deben acceder en sentido contrario al movimiento del humo.

3.3.5.4 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO: POTENCIA DE INCENDIO

Antes de 1995, se realizaron una serie de incendios experimentales en túneles para determinar sus características. Muchas de las características que se determinaron en dichos ensayos, aun se utilizan en los diseños. Algunos de los incendios experimentales realizados más importantes son:

Tabla 3.20. Algunos incendios experimentales anteriores a 1995 [24]

Lugar	País	Fecha	Observaciones
Offeneg	Suiza	1965	
Zwenberg	Austria	1974-5	
PWRI	Japón	1980	Túnel artificial construido ex profeso
Runnehamar*	Noruega	1990-2	Proyecto EUREKA FIRETUN de la Unión Europea
Memorial Túnel*	Virginia (USA)	1993-5	Proyecto de la FHWA y Parsons para la Central Artery en Boston

Hoy en día, se tiene como referencia las recomendaciones dadas por la PIARC, basadas en los distintos ensayos del proyecto EUREKA 499 [28] y los realizados en Estados Unidos en el Proyecto de la Central Artery, en el que como carga de fuego típica para un vehículo pesado tiene una potencia calorífica en torno a los 30 MW.

• 1 small passenger car	2.5 MW
• 1 large passenger car	5 MW
• 2 – 3 passenger cars	8 MW
• 1 van	15 MW
• 1 bus	10 MW
• 1 lorry with burning goods (general case)	20-30 MW
• petrol tanker depending on drainage	30-250 MW

Figura 3.13. Valores de potencia calorífica disipada en un incendio para diferentes tipos de vehículos [29]

En España, los requisitos establecidos por el R.D.635/2006, exige como criterio de cálculo una potencia de incendio de 30 MW.

En cambio, el análisis de los graves accidentes acaecidos durante los años 1999 y 2000 en los túneles de Mont Blanc, Tauern, San Gotardo reflejaron potencias máximas de fuego muy importantes y de diversa magnitud (20 – 200 MW).

Como experiencias más recientes cabe mencionar los programas de ensayos a escala real llevados a cabo en el Beneluxtunnel y Runehamar (proyecto UPTUN) [30].

Los primeros, con cargas moderadas, reflejaron potencias de fuego no superiores a los 30 MW. Sin embargo, en los segundos, llevados a cabo por el SP (Swedish National Testing Research Institute) en Noruega dentro del proyecto europeo UPTUN, las cargas de fuego obtenidas fueron muy superiores, como se puede apreciar en las siguientes gráficas:

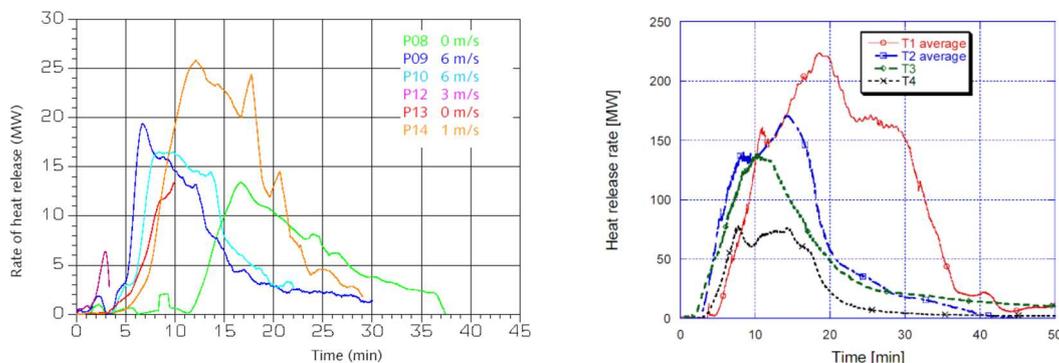


Figura 3.14. Curvas de incendio. Ensayos reales Benelexntunnel / Runehamar

En cuanto a las recomendaciones empleadas en otros países son particularmente detalladas las francesas donde se proponen distintas curvas de incendio normalizadas a utilizar en los modelos numéricos que se emplean para el análisis de riesgos en túneles [31]. En la Tabla 3.21 se recogen los parámetros más significativos de algunas de las curvas propuestas (Figura 3.15). Cabe señalar la incorporación de una categoría adicional, correspondiente al incendio de un vehículo pesado con una carga importante de tipo combustible (potencia de incendio máxima de 200 MW), más acorde con las cargas de fuego empleadas en los ensayos de Runehamar.

Tabla 3.21. Valores de potencia incendio según tipo de vehículo

Parámetro	2-3 coches	furgoneta	veh.pesado	veh.pesado carga combustible	Cisterna
Potencia total (MW)	8	15	30	100	200
Tiempo crec. (min)	5	5	10	10	10
Tiempo pico (min)	20	30	50	60	60
Tiempo dec. (min)	20	20	30	20	30

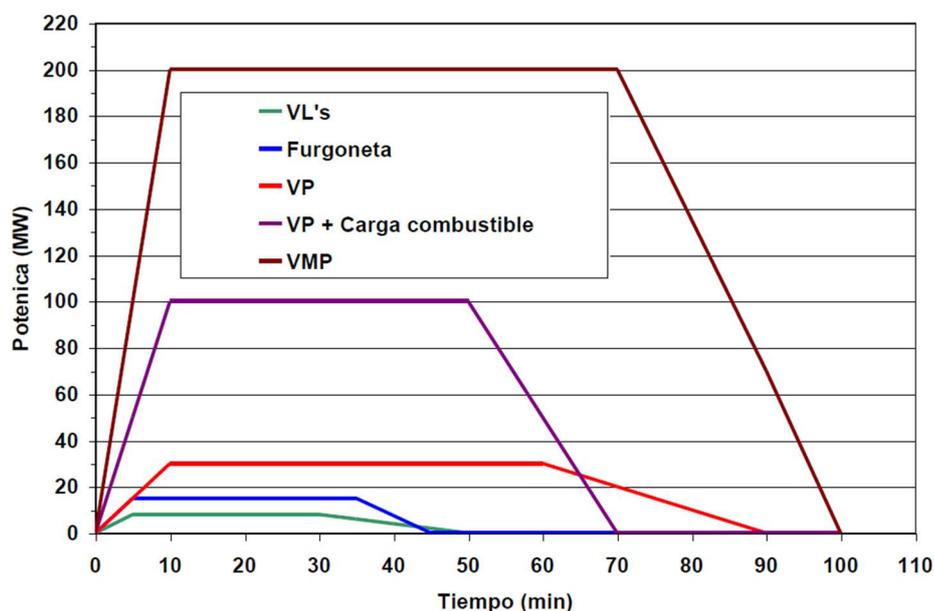


Figura 3.15. Curva evolución de la potencia de incendio [31]

Todos los ensayos y pruebas de incendios a escala real realizados han mostrado que las condiciones de ventilación, la sección del túnel y su altura influyen en el crecimiento y en el tamaño del incendio.

Más allá de los valores específicos de cada normativa, los países adoptan una potencia de incendio dependiendo del tipo de vehículos autorizado por el túnel, en el que asumen que es más probable la ocurrencia de un gran incendio en túneles con vehículos pesados y con mercancías peligrosas.

A nivel nacional, la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la R.C.E. (MARTE) establece 5 tipos de escenarios a analizar:

- Escenario 1: Incendio de uno o dos vehículos ligeros: Se considera como potencia máxima de fuego representativa de este escenario 8 MW.
- Escenario 2: Incendio de un vehículo pesado y otro vehículo ligero. Se considera como potencia máxima de fuego representativa de este escenario 30 MW.
- Escenario 3: Incendio de un vehículo ligero y un autocar. Se considera como potencia máxima de fuego del incendio 15 MW.
- Escenario 4: Incendio de un vehículo pesado y un autocar. Se considera como potencia máxima de fuego representativa de este escenario 30 MW.
- Escenario 5: Incendio de un vehículo capaz de provocar un incendio de gran magnitud y otro vehículo, con una potencia de incendio de referencia de hasta 100 MW.

En nuestro caso, se va a adoptar el caso más desfavorable, la curva de incendio de gran magnitud, de una potencia de incendio de hasta 100 MW (Figura 3.16), correspondiente al incendio de dos vehículos. Se considera representativo este escenario de los posibles accidentes, en que se vean involucrados transportes de mercancías especiales, capaces de provocar incendios de elevada potencia.

Esta curva se corresponde al escenario 5 de la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la R.C.E. (escenario considerado de mayor potencia de incendio):

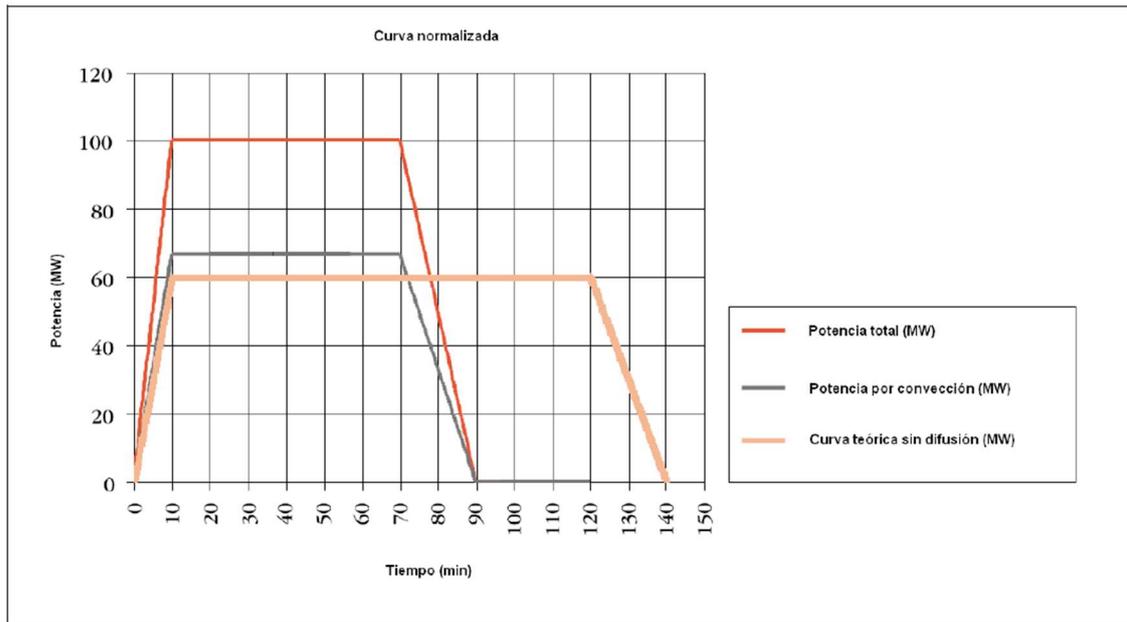


Figura 3.16. Curva normalizada de potencia de incendio 100MW [32]

3.3.5.5 DATOS DE PARTIDA

Se presentan en las siguientes tablas los datos de partida utilizados para el dimensionamiento de la ventilación en caso de incendio para el túnel de Erinyà:

Características geométricas

Tabla 3.22. Características geométricas. Fuente: elaboración propia

Características geométricas	
Longitud (m)	630
Pendiente (%)	2,10%
Sección del túnel (m ²)	72,75
Perímetro del túnel	33,46
Número de carriles (boca1->boca2)	1
Número de carriles (boca2->boca1)	1
Tipo de túnel	Rural
Altitud (m)	650
Tipo de circulación	Bidireccional
Velocidad de diseño (km/h)	80

Características de tráfico**Tabla 3.23. Características de tráfico. Fuente: elaboración propia**

Características de tráfico	
IMD (veh/d)	1.648
Proporción entre sentidos de circulación (%)	55,00%
Intensidad horaria (veh/h)	181,28
%VL	90,15%
-% VL gasolina (60%*VL)	40,09%
-% VL diésel (40%*VL)	59,91%
%VLC	5,00%
-% VLC gasolina (25%*VLC)	30,15%
-% VLC diésel (75%*VLC)	69,85%
%VP	4,85%

Características climatológicas**Tabla 3.24. Características climatológicas. Fuente: elaboración propia**

Características en boca	Boca 1	Boca 2
Altitud de la boca (m)	650	663
Temperatura en la boca (°C)	20	20
Densidad del aire en el exterior (kg/m ³)	1,20	1,20
Presión en boca (Pa)	94.083	93.946
Velocidad del viento exterior (m/s)	5 m/s (sentido: de boca 2 a boca 1)	

Características específicas de los vehículos**Tabla 3.25. Características de los vehículos. Fuente: elaboración propia**

Características vehículos	
Número de vehículos ligeros sentido 1	94,87
Número de vehículos ligeros sentido 2	77,62
Número de vehículos pesados sentido 1	4,84
Número de vehículos pesados sentido 2	3,96
Nº vehículo ligeros simultáneamente s/1 [i lig s1]	0,75
Nº vehículo ligeros simultáneamente s/2 [i lig s2]	0,61
Nº vehículos pesados simultáneamente s/1 [i pes s1]	0,04
Nº vehículos pesados simultáneamente s/2 [i pes s2]	0,03
Área de la sección transversal de veh. Lig. [A veh.lig.] (m ²)	2,00
Coefficiente aerodinámico veh.lig. [Cx lig]	0,90
Área de la sección transversal de veh.pes. [A veh.pes] (m ²)	8,00
Coefficiente aerodinámico veh.pes. [Cx pes.]	4,55

Características de los ventiladores escogidos:**Tabla 3.26. Características de los ventiladores. Fuente: elaboración propia a partir de modelo seleccionado de fabricante**

Características generales del ventilador	
Coeficiente de eficiencia nominal	0,96
Coeficiente de instalación	0,90
Coeficiente de proximidad	1,00
Diámetro interior del ventilador - $[\Phi]$ (m)	1,20
Velocidad de chorro - $[Vch]$ (m/s)	38
Potencia instalada(kW)	55
Empuje Teórico- $[Et]$ (N)	1865

Consideraciones sobre el sistema de ventilación:**Tabla 3.27. Consideraciones de cálculo para el sistema de ventilación. Fuente: elaboración propia**

Consideraciones de cálculo del sistema de ventilación	
Diámetro hidráulico de referencia - $[Dh]$ (m)	8,70
Mínima distancia entre ventiladores – $10 \cdot Dh$ (m)	86,97
Mínima distancia entre ventiladores con deflector de 5° (m) -20%	69,58
Mínima distancia entre ventiladores con deflector de 10° (m) -40%	52,18
Temperatura límite de resistencia del ventilador ($^\circ C$)	400 / 2h
Distancia de inutilización de un ventilador aguas abajo (m)	20
Distancia de inutilización de un ventilador aguas arriba (m)	80

3.3.5.6 1^{ER} MÉTODO DE CÁLCULO: DIMENSIONAMIENTO MEDIANTE LA COMPUTACIÓN DE TODAS LAS PÉRDIDAS DE CARGA EXISTENTES

El método de cálculo es de tipo unidimensional en régimen estacionario. Esto implica que se obtiene un resultado de empuje necesario cuando el incendio está completamente desarrollado, obteniéndose una solución de ventiladores que busca garantizarla velocidad crítica en un intervalo de tiempo indefinido. En este sentido, no se encuentran argumentos que permitan justificar el mantenimiento de la velocidad crítica en los primeros 15 minutos y superior en el resto del tiempo.

3.3.5.6.1 FORMULACIÓN

En el caso de sistemas de ventilación longitudinal el método de cálculo empleado para el dimensionamiento es de enorme importancia. En primer lugar, para asegurar que todos los

efectos son tenidos en cuenta adecuadamente y, en segundo, para entender la influencia de las hipótesis de incendio planteadas en la solución de ventilación resultante.

El dimensionamiento de un sistema de ventilación longitudinal consiste en la determinación del número de ventiladores necesarios para lograr la velocidad del aire crítica en el escenario más desfavorable.

Como se ha indicado anteriormente, se ha utilizado la formulación y procedimiento indicado por la PIARC y el CETU en los informes[23] y [24], para el dimensionamiento de la ventilación longitudinal en caso de incendio.

Bajo estas hipótesis el número de aceleradores a instalar será tal que aporten el empuje suficiente para contrarrestar las pérdidas existentes a lo largo de todo el túnel. Así se debe cumplir la siguiente ecuación de equilibrio:

$$\sum_{n=1}^{num\ vent} \Delta P_n \geq \Delta P_{fricción} + \Delta P_{veh} + \Delta P_{vto} + \Delta P_{chim} + \Delta P_{sing} + \Delta P_{ince} \quad (Pa) \quad (3.7)$$

Ecuación 3.7. Ecuación de equilibrio: empuje de ventiladores y pérdidas de carga consideradas en el túnel

Siendo:

- ΔP_n : Empuje generado por los ventiladores.
- $\Delta P_{fricción}$: Pérdidas de carga por rozamiento.
- ΔP_{sing} : Pérdidas de carga singularidades.
- ΔP_{veh} : Pérdidas de carga por vehículos detenidos en el túnel.
- ΔP_{atm} : Diferencia de presión entre bocas por condiciones atmosféricas (gradiente de temperatura, meteorología y viento).
- ΔP_{chim} : Efecto ascendente debido a efectos de flotabilidad por incendio.
- ΔP_{ince} : Pérdidas debidas al efecto del incendio.

A continuación, se describe cada uno de los efectos:

Pérdidas de carga por rozamiento

Se refiere a las pérdidas debidas a la fricción con las paredes. Es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad media en el tubo y a la longitud del mismo e inversamente proporcional al diámetro. Las pérdidas por rozamiento se oponen siempre al empuje de los ventiladores. La fórmula que expresa estas relaciones es la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P_{fricción} = \lambda * \frac{L}{D_h} * \frac{\rho_{int} * Va^2}{2} \quad (Pa) \quad (3.8)$$

Ecuación 3.8. Pérdidas debidas a la fricción con las paredes

Siendo:

- λ : Coeficiente de rozamiento del túnel (adimensional). Oscila entre 0.02-0,04, en función del acabado interior del túnel (hormigón, roca, revestimiento, etc). Se establece para el cálculo 0,04, al no disponer de revestimiento rígido.
- L: Longitud del túnel [m].
- Va: Velocidad del aire [m/s].
- ρ_{int} : Densidad del aire en el interior del túnel [kg/m³].
- D_h = Diámetro hidráulico [m].

Pérdidas de carga singulares

Estas pérdidas, en general, se refieren a las que se producen cuando el fluido atraviesa un cambio de sección, un codo, etc. Al igual que las pérdidas por fricción, estas también se oponen siempre al empuje de los ventiladores. En el caso particular de los túneles, habrá que diferenciar entre las pérdidas originadas al entrar el aire en el túnel y las pérdidas a la salida, obteniéndose con la siguiente expresión:

$$\Delta P_{sing} = (\alpha * \beta) * \frac{\rho_{int} * Va^2}{2} \quad (Pa) \quad (3.9)$$

Ecuación 3.9. Pérdidas de cargas singulares

Siendo:

- α : Coeficiente de pérdidas singulares en la entrada. Normalmente se utiliza un valor de 0,5.
- β : Coeficiente de pérdidas singulares en la salida. Normalmente se utiliza un valor de 1,0.
- ρ_{int} : Densidad del aire en el interior del túnel (kg/m^3).
- V_a : Velocidad del aire (m/s).

Pérdidas de carga por vehículos

Los vehículos en el interior del túnel ejercen una fuerza debido a su resistencia aerodinámica. Este efecto crea un empuje positivo cuando los vehículos circulan en el mismo sentido que el aire de ventilación, excepto cuando circulan a velocidad más baja que este, y negativo cuando lo hace en sentido opuesto.

El efecto es siempre desfavorable cuando los vehículos están parados, hipótesis adoptada para el dimensionamiento en régimen permanente.

La expresión mediante la cual se calcula el efecto pistón es la que sigue; en la suma de los efectos en cada carril se ha de tener en cuenta el signo que lleva el efecto pistón en ese carril.

$$\Delta P_{veh} = \sum_1^{n^{\circ} \text{ carriles}} C_x * \frac{A_{veh}}{A_{túnel}} * i * \rho * \frac{(V_{VH} \pm V_a)^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (3.10)$$

Ecuación 3.10. Efecto pistón

Siendo:

- C_x : Coeficiente aerodinámico de los vehículos. Tiene en cuenta el diferente comportamiento aerodinámico de los cuerpos debido a su forma. Los valores que usualmente se toman como medios son 0,6 para vehículos ligeros y 0,8 para vehículos pesados [adimensional].
- F_v : Área de la sección transversal de los vehículos [m^2]

- $A_{veh.}$: Área frontal de los vehículos [m^2]. Se toma un área media para los vehículos ligeros y otra para los vehículos pesados. Los valores empleados usualmente están alrededor de $2 m^2$ y $8 m^2$ respectivamente.
- $A_{túnel}$: Área de la sección transversal del túnel [m^2].
- ρ : Densidad del aire [kg/m^3].
- V_{VH} : Velocidad de los vehículos [m/s]. Se considera nula.
- V_a : Velocidad del aire de ventilación [m/s].
- i : Número de vehículos que circulan, de cada tipo considerado.

$$i \text{ veh. ligeros} = \frac{n^{\circ} \text{ veh. ligeros} * \text{longitud túnel}}{\text{velocidad}} ; \quad (3.11)$$

$$i \text{ veh. pesados} = \frac{n^{\circ} \text{ veh. pesados} * \text{longitud túnel}}{\text{velocidad}}$$

Ecuación 3.11. Nº de vehículos simultáneamente en el túnel

Pérdidas por condiciones atmosféricas: Viento exterior

Se tratan aquellos efectos de carácter aleatorio que son responsables del tiro natural. Se consideran las pérdidas debidas al efecto del viento, la diferencia de presión barométrica entre bocas y el efecto chimenea. El efecto del viento suele ser el principal responsable de la diferencia de presión entre bocas, calculado con la siguiente expresión:

$$\Delta P_{vto} = \frac{\rho_o * V_v^2 * \cos^2 \varepsilon}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (3.12)$$

Ecuación 3.12. Pérdidas por viento exterior

Siendo:

- ρ_o : Densidad a temperatura ambiente [kg/m^3].
- V_v : Velocidad del viento en la zona donde se encuentra el túnel [m/s].
- ε : Ángulo de incidencia del viento con respecto al eje longitudinal del túnel. Se considera longitudinal a la boca de acceso al túnel.

A partir de la información disponible en la página web: www.meteo.cat, del Servei Meteorològic de Catalunya, para la zona de la Pobla de Segur, próximo al túnel (estación Y3 comarca del Pallars Jussà), se obtiene la siguiente rosa de los vientos de los últimos 5 años registrados (2017-2021):

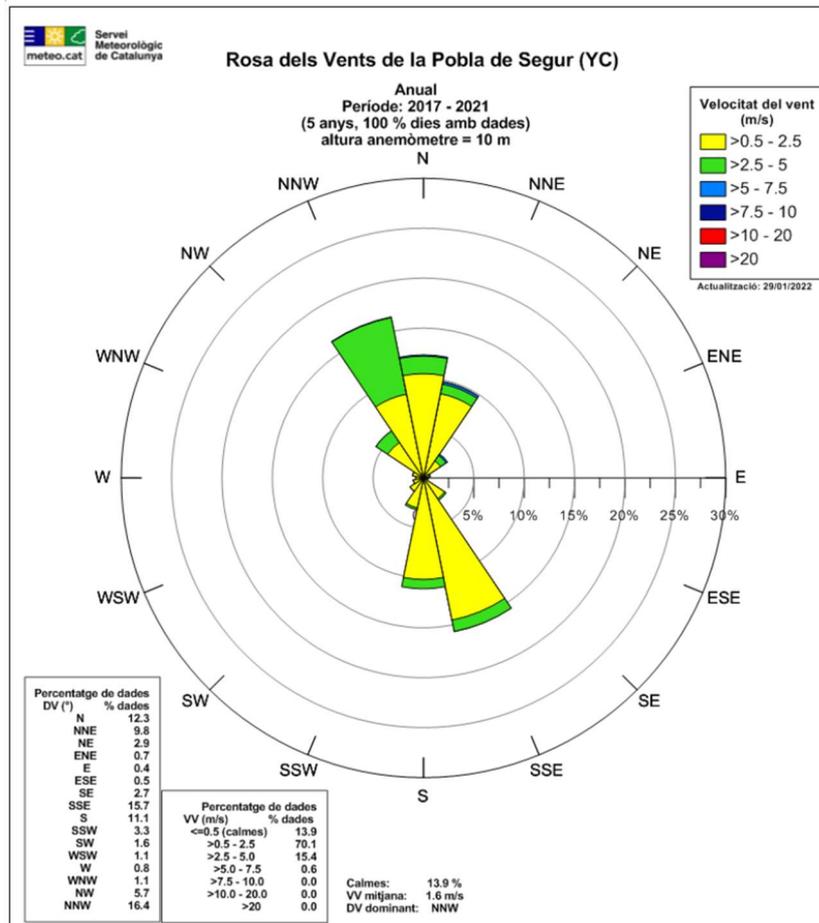


Figura 3.17. Rosa de los vientos. Estación meteorológica de La Pobla de Segur. Fuente: Servei Meteorològic de Catalunya

Como se puede apreciar, no existen vientos de excesiva importancia en la zona. Las direcciones predominantes son hacia el NNW y SSE.

Así, poniéndonos del lado de la seguridad, se establece un valor de 5 m/s de viento exterior, en dirección longitudinal a las bocas del túnel.

Por otro lado, la influencia de la presión barométrica ha de considerarse para túneles de gran longitud que atraviesen cadenas montañosas, a los extremos de las cuales se puedan

producir situaciones meteorológicas diferentes. En este caso en concreto, no se ha considerado pérdidas debidas a efectos barométricos, ya que no se cumplen estas circunstancias.

Pérdidas por el efecto chimenea

En túneles cortos pero con pendiente considerable es necesario contemplar el efecto producido por el incremento de la temperatura en el interior del túnel al desarrollarse el incendio, ya que el humo caliente se moverá en dirección ascendente.

Cuando los gases calientes se desplazan por el túnel, los efectos de flotabilidad adquieren gran importancia, generando un empuje adicional en sentido ascendente.

Una vez determinada la distribución de temperaturas debido al incendio es posible calcular el empuje generado, integrando sobre la longitud del tubo llena de humo, la siguiente expresión:

$$\Delta P_{chim} = \alpha * L * (\rho_o - \rho_{int}) * g \text{ (Pa)} \quad (3.13)$$

Ecuación 3.13. Pérdidas por efecto chimenea

Siendo:

- ρ_o : Densidad del aire a temperatura ambiente [kg/m³].
- ρ_{int} : Densidad del aire en el interior del túnel [kg/m³] (depende de la temperatura en cada zona del túnel).
- α : Pendiente del túnel [%]
- L: Longitud del túnel [m]
- g: aceleración de la gravedad [m/s²]

Pérdidas debidas al efecto del incendio

La presencia de un incendio en el túnel produce pérdidas debido a la expansión de los humos, que generan una constricción de la corriente del aire.

Las pérdidas por bloqueo del incendio se determinan a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_{\text{incendio}} = c * \frac{Q_c}{V_a + Dh^2} \quad (3.14)$$

Ecuación 3.14. Pérdidas por bloqueo del incendio

Siendo:

- c: constante adimensional de valor igual a $9 \cdot 10^{-5}$
- Q_c : Potencia convectiva de incendio [W]
- V_a : Velocidad del aire en el interior del túnel [m/s]
- Dh : Diámetro hidráulico del túnel [m]

Empuje de los ventiladores

Una vez se han calculado las pérdidas de carga originadas por el incendio, se debe obtener el nº de ventiladores necesarios para poder aportar la presión suficiente que permita vencer estas pérdidas de carga y superar la velocidad crítica de ventilación. Si bien durante el funcionamiento normal del túnel los ventiladores trabajarán en el sentido que tengan que vencer menos resistencia (el tráfico y las condiciones atmosféricas pueden ser efectos favorables), el sistema implantado debe ser capaz de vencer todos los efectos en contra. En el cálculo, se ha considerado todos los efectos descritos en contra del empuje que ejercen los ventiladores.

Los ventiladores que se instalan habitualmente en un túnel con ventilación longitudinal son de tipo jet, basando su funcionamiento en la transferencia de cantidad de movimiento.

El empuje que aporta un ventilador está afectado por condiciones del ambiente en que trabaja, con lo que se tiene un empuje real (E_{real}) que difiere del nominal que aparece en catálogos, el cual se determina con la siguiente expresión:

$$E_{real} = E_{nom} * \frac{\rho}{\rho'} * \left(1 - \frac{V_a}{V_{chorr}}\right) * \eta_{inst} \quad (3.15)$$

Ecuación 3.15. Empuje real aportado por los ventiladores

Siendo:

- V_a : velocidad del aire de ventilación en el interior del túnel [m/s]
- V_{chorro} : velocidad del aire en la sección del ventilador [m/s]
- ρ : densidad del aire en el ventilador [kg/m³].
- ρ' : densidad del aire en condiciones estándar [kg/m³].
- E_{nom} : empuje unitario/nominal del ventilador [N]
- η_{inst} : factor de rendimiento (incluye pérdidas de eficiencia por agrupamiento de equipos, cercanía a la pared, rendimiento hidráulico, etc.)

Se debe hacer hincapié a la importancia que, en caso de incendio, presenta el efecto del incremento de la temperatura, el cual produce una disminución del empuje generado por los ventiladores, debido a la disminución de la densidad.

Cada jet instalado produce un incremento de presión en la corriente de aire que se determina se determina según la siguiente expresión:

$$\Delta P_n = \sum_1^n vent \frac{\eta_{inst} * E_{nom}}{S_t} * \left(1 - \frac{V_{cri}}{V_{chorro}} * \frac{T(x)}{T_o}\right) * \left(\frac{T_o}{T(x)}\right) \text{ (Pa)} \quad (3.16)$$

Ecuación 3.16. Presión ejercida por los ventiladores

Siendo:

- S_t = Sección transversal del túnel [m²]
- V_{cri} : velocidad crítica de diseño [m/s]
- V_{chorro} : velocidad del aire en la sección del ventilador [m/s]
- $T(x)$: Temperatura del aire en un punto x del túnel [K]
- T_o = Temperatura ambiente [K]

3.3.5.6.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Para el cálculo del sumatorio de pérdidas de carga en cada posición de incendio, se discretiza el túnel en segmentos de reducida longitud (se ha establecido intervalos de 5 metros). Se computa las pérdidas de carga en todo su conjunto, a partir de la variación de los valores de temperatura, presión, densidad y velocidad del aire para cada uno de los segmentos discretizados.

En la Tabla 3.28 se presenta, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos de pérdidas de carga, para la posición de incendio del 50% de la longitud del túnel:

Tabla 3.28. Hoja de cálculo de pérdidas de carga discretizando el túnel en segmentos de 5 metros de longitud. Posición de incendio: 50%-long.túnel. Fuente: elaboración propia.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot. incendio: 100MW									
315 m		50%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)	
BOCA SUR					2,36					2,356	
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177	
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216	
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,145		0,183	
50,0%	315	0,63	583,04	0,02		0,60		0,075	28,37	29,056	
50,8%	320	0,63	559,64	0,02		0,59		0,076		0,687	
51,6%	325	0,63	557,84	0,02		0,59		0,076		0,686	
52,4%	330	0,63	556,04	0,02		0,59		0,076		0,684	
53,2%	335	0,64	554,24	0,02		0,59		0,077		0,682	
54,0%	340	0,64	552,44	0,02		0,58		0,077		0,680	
54,8%	345	0,64	550,73	0,02		0,58		0,077		0,678	
55,6%	350	0,64	548,98	0,02		0,58		0,077		0,677	
56,3%	355	0,65	547,25	0,02		0,58		0,077		0,675	
57,1%	360	0,65	545,53	0,02		0,57		0,078		0,673	
57,9%	365	0,65	543,82	0,02		0,57		0,078		0,671	
58,7%	370	0,65	542,12	0,02		0,57		0,078		0,670	
59,5%	375	0,65	540,43	0,02		0,57		0,078		0,668	
60,3%	380	0,66	538,76	0,02		0,57		0,079		0,666	
61,1%	385	0,66	537,10	0,02		0,56		0,079		0,664	
61,9%	390	0,66	535,44	0,02		0,56		0,079		0,662	
62,7%	395	0,66	533,80	0,02		0,56		0,079		0,661	
63,5%	400	0,66	532,17	0,02		0,56		0,080		0,659	
64,3%	405	0,67	530,55	0,02		0,56		0,080		0,657	
65,1%	410	0,67	528,94	0,02		0,55		0,080		0,655	
65,9%	415	0,67	527,35	0,02		0,55		0,080		0,653	
66,7%	420	0,67	525,76	0,02		0,55		0,081		0,652	
67,5%	425	0,67	524,18	0,02		0,55		0,081		0,650	
68,3%	430	0,68	522,62	0,02		0,55		0,081		0,648	
69,0%	435	0,68	521,07	0,02		0,54		0,081		0,646	
69,8%	440	0,68	519,52	0,02		0,54		0,082		0,645	
70,6%	445	0,68	517,99	0,02		0,54		0,082		0,643	
71,4%	450	0,68	516,46	0,02		0,54		0,082		0,641	
72,2%	455	0,69	514,95	0,02		0,53		0,082		0,639	
73,0%	460	0,69	513,45	0,02		0,53		0,083		0,638	
73,8%	465	0,69	511,96	0,02		0,53		0,083		0,636	
74,6%	470	0,69	510,47	0,02		0,53		0,083		0,634	
75,4%	475	0,69	509,00	0,02		0,53		0,083		0,632	
76,2%	480	0,70	507,54	0,02		0,52		0,084		0,631	
77,0%	485	0,70	506,09	0,02		0,52		0,084		0,629	
77,8%	490	0,70	504,65	0,02		0,52		0,084		0,627	
78,6%	495	0,70	503,21	0,02		0,52		0,084		0,625	
79,4%	500	0,70	501,79	0,02		0,52		0,085		0,624	
80,2%	505	0,71	500,38	0,02		0,51		0,085		0,622	
81,0%	510	0,71	498,97	0,02		0,51		0,085		0,620	

81,7%	515	0,71	497,58	0,02						
82,5%	520	0,71	496,19	0,02						
83,3%	525	0,71	494,82	0,02						
84,1%	530	0,72	493,45	0,02						
84,9%	535	0,72	492,09	0,02						
85,7%	540	0,72	490,75	0,02						
86,5%	545	0,72	489,41	0,02						
87,3%	550	0,72	488,08	0,02						
88,1%	555	0,73	486,76	0,02						
88,9%	560	0,73	485,45	0,02						
89,7%	565	0,73	484,14	0,02						
90,5%	570	0,73	482,85	0,02						
91,3%	575	0,73	481,56	0,02						
92,1%	580	0,74	480,29	0,02						
92,9%	585	0,74	479,02	0,02						
93,7%	590	0,74	477,76	0,02						
94,4%	595	0,74	476,51	0,02						
95,2%	600	0,74	475,27	0,02						
96,0%	605	0,74	474,03	0,02						
96,8%	610	0,75	472,81	0,02						
97,6%	615	0,75	471,59	0,02						
98,4%	620	0,75	470,38	0,02						
99,2%	625	0,75	469,18	0,02						
100,0%	630	0,75	467,99	0,02						
BOCA NORTE					4,71		15,06			
Dp Requerido (Pa)				3,83	7,07	33,80	15,06	16,43	28,37	104,55
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	3,83
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	33,80
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	16,43
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	104,55
Total. Dp Ventiladores (Pa)	126,25

Posición de incendio	
315 m	50%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido)	CORRECTO
--------------------------------------	----------

En el anexo I, se incluyen los resultados mostrados en la tabla anterior (cálculo de las pérdidas de carga), para el resto de las posiciones de incendio estudiadas.

Como se puede observar en la Tabla 3.28, se ha tenido en cuenta la evolución de la temperatura del aire a lo largo del túnel. En el caso de los túneles, en los que se puede suponer una corriente de tipo longitudinal, el aire calentado en la posición del foco del incendio va reduciendo su temperatura debido al intercambio de calor con las paredes (disminución longitudinal de la temperatura).

La potencia térmica generada por el fuego se disipa por dos mecanismos distintos: de una parte, los fenómenos de radiación hacia el entorno próximo y del otro los procesos de convección por los que el aire que atraviesa las cercanías del foco incrementa su temperatura.

La potencia térmica transferencia por radiación corresponde a un tercio de la potencia total del incendio, por lo que la potencia térmica transferida al aire por convección equivale a dos tercios de la potencia total. Este comportamiento está reconocido y es aplicado en los métodos de cálculo empleados en las recomendaciones de los distintos países [24].

Tal y como se ha indicado en el 3.3.5.6.1, se debe tener en cuenta el aumento de la temperatura, a la hora de calcular el empuje generado por los ventiladores.

Por lo tanto, para el caso presentado en la Tabla 3.28, (posición de incendio al 50% de la longitud del túnel), se obtiene la siguiente tabla (Tabla 3.29), donde se muestra el empuje generado por cada ventilador, en función de las condiciones en la posición donde están ubicados.

Por otro lado, en esta posición de incendio, todos los ventiladores están operativos, ya que la distancia a la que se encuentran del foco del incendio es superior a las distancias de inoperatividad aguas arriba y abajo del incendio impuestas:

Tabla 3.29. Empuje generado por los ventiladores. Posición de incendio:50% de la longitud del túnel. Fuente: elaboración propia.

Posición del incendio	Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m ³)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
				Límite min.	Límite max.				
50,00%	1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
	2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
	3	ON	415,00	335	435	527,35	0,67	2	21,35
	4	ON	515,00	435	535	497,58	0,71	2	22,83
									126,25

En el anexo I, se presenta el empuje generado por los ventiladores para cada posición de incendio estudiada.

A continuación, a partir de los cálculos y resultados obtenidos, se genera la Tabla 3.30, donde se resumen las pérdidas de carga obtenidas, a partir de las fórmulas expuestas, para todas las posiciones de incendio analizadas (50-100% en intervalos del 5% de la longitud del túnel).

Tabla 3.30. Pérdidas a diferentes posiciones de incendio. Fuente: elaboración propia

Pérdidas de carga en diferentes posiciones de incendio del túnel (Pa)									
% túnel	Posición incendio (m)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing.entra (Pa)	Dp.sing.sal. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Σ Dp Requerido (Pa)
50%	315	3,83	2,36	4,71	33,80	15,06	28,37	16,43	104,55
55%	347	3,91	2,36	4,71	31,10	15,06	28,37	16,97	102,48
60%	378	4,00	2,36	4,71	28,20	15,06	28,37	17,50	100,20
65%	410	4,09	2,36	4,71	25,23	15,06	28,37	18,04	97,87
70%	441	4,21	2,36	4,71	21,68	15,06	28,37	18,68	95,06
75%	473	4,30	2,36	4,71	18,55	15,06	28,37	19,24	92,58
80%	504	4,40	2,36	4,71	15,34	15,06	28,37	19,81	90,05
85%	536	4,52	2,36	4,71	11,51	15,06	28,37	20,48	87,01
90%	567	4,63	2,36	4,71	8,15	15,06	28,37	21,06	84,33
95%	599	4,74	2,36	4,71	4,71	15,06	28,37	21,66	81,59
100%	630	4,86	2,36	4,71	0,60	15,06	28,37	22,33	78,28

Posición y características de los ventiladores

El número final de ventiladores de cada tramo es el necesario para hacer frente a todas las posiciones de incendio, considerando simultáneamente las pérdidas de carga generadas y el rendimiento de cada uno de los equipos.

Los criterios establecidos para la elección de los ventiladores son los siguientes:

- Sistema de ventilación longitudinal basado en ventiladores de chorro instalados a lo largo de los túneles para garantizar la calidad del aire y un entorno seguro para ambos modos de operación: normal y de emergencia.
- Ventiladores 100% reversibles, ubicados por parejas a lo largo del túnel
- Las parejas de ventiladores ubicadas a 20 metros aguas arriba del incendio, retroceso del humo, y a 80 metros aguas abajo, en sentido de la corriente de aire, se consideran destruidas por el incendio, y, por lo tanto, inoperativas. Estas distancias se corresponden con los movimientos de corriente de aire caliente que inducen la ventilación del túnel y que inhabilitan los ventiladores cercanos al foco del incendio.
- La separación longitudinal entre ventiladores debe ser mayor a 10 veces el diámetro hidráulico del túnel (87 m), para que no se afecten mutuamente y no se reduzca por ello la eficiencia del sistema de ventilación, siendo importante que esa distancia sea tal que la velocidad del aire aspirado por un ventilador sea igual a la velocidad media del aire del túnel.
- Las parejas de ventiladores más cercanas a las bocas de entrada se deben colocar a más de 40 diámetros del ventilador (56 m), para que no se reduzca excesivamente la eficiencia en caso de incendio. [14]
- Los ventiladores tendrán una resistencia a altas temperaturas de 400°C durante al menos 2 horas.

Para establecer los criterios se ha seguido el documento: *Recomendaciones para la normalización de equipos de ventilación*, elaborado por el Comité técnico C5 de túneles de carretera de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC).

De cara a determinar el ventilador reversible que mejor se adapte al túnel y a los criterios de diseño impuestos para obtener el mayor rendimiento posible del conjunto de la ventilación, se han realizado las diferentes simulaciones con tres modelos de ventiladores de diferente potencia de un reconocido fabricante de ventiladores para túneles, cuyas características son las siguientes:

Tabla 3.31. Características de los ventiladores analizados. Fuente: elaboración propia a partir del catálogo de fabricante ZITRÓN

Características	Modelo 1: JZ 12-37/4	Modelo 2: JZ 12-45/4	Modelo 3: JZ 12-55/4
Ventilador tipo	Jet fan	Jet fan	Jet fan
Reversibilidad	Sí (100%)	Sí (100%)	Sí (100%)
Potencia instalada (kW)	37	45	55
Potencia absorbida (kW)	36,6	44,6	54,5
Empuje nominal (N)	1.441	1.633	1.865
Caudal de aire (m ³ /s)	37,8	39,9	43,0
Velocidad de chorro (m/s)	33,4	35,6	38,0
Resistencia a temperatura	400°C / 2horas	400°C / 2horas	400°C / 2horas

En lo que respecta al material del ventilador, toda la estructura metálica (carcasa donde se alojan el motor y el rodete, toberas de aspiración, rejillas, y silenciadores tubulares), es de acero inoxidable.

Los ventiladores se deben fijar a la bóveda del túnel mediante cuatro anclajes (pernos de sujeción) situados en cuatro extremos del ventilador y un punto de anclaje adicional que se situará en medio del ventilador (Figura 3.18).

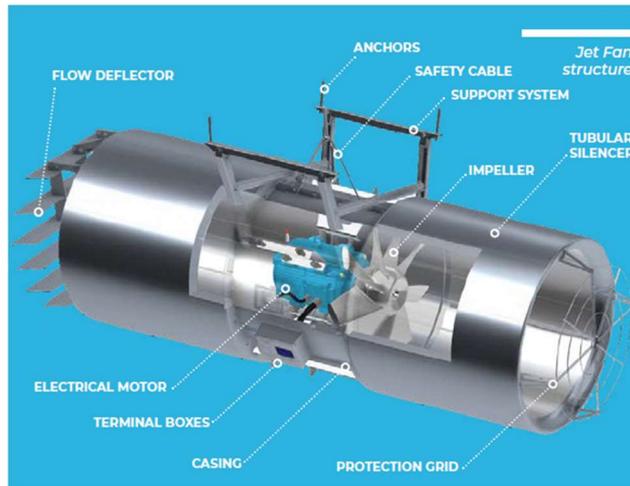


Figura 3.18. Componentes del Jet fan. Fuente: Catálogo ZITRÓN

Las dimensiones de los tres modelos de ventiladores son las mismas, siendo:

Tabla 3.32. Dimensiones del ventilador. Fuente: elaboración propia a partir del Catálogo del fabricante ZITRÓN

Dimensiones del ventilador seleccionado (mm)					
Modelo jet fan	D (diámetro interior)	DM (diámetro exterior)	LT (longitud total)	LS (longitud silenciador)	LF (Longitud carcasa motor)
JZRi 12	1.200	1.400	3.450	1.275	900

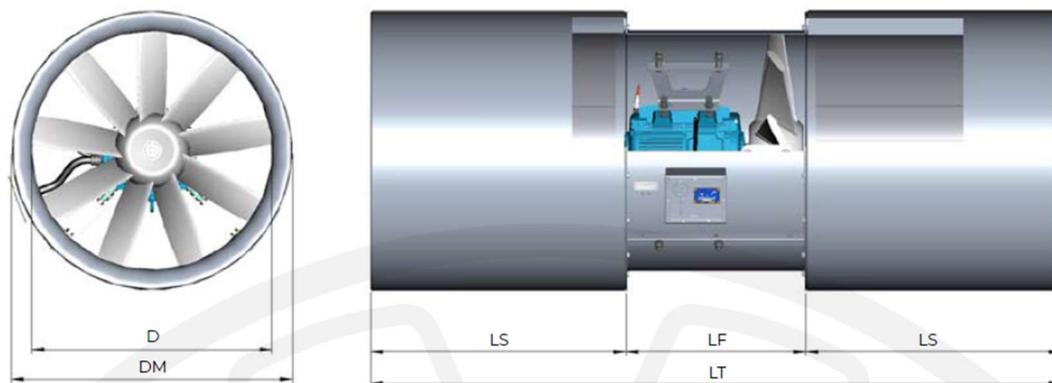


Figura 3.19. Jet fan. Fuente: Catálogo fabricante ZITRÓN-2022

Se colocan en parejas en las 4 siguientes posiciones:

Tabla 3.33. Posición de los ventiladores. Fuente: elaboración propia

Pareja	nº de venti.	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		η_1	η_2	η_3	η_{total}
			Límite min.	Límite max.				
1	2	115	35	135	0,96	0,9	1	0,86
2	2	215	135	235	0,96	0,9	1	0,86
3	2	415	335	435	0,96	0,9	1	0,86
4	2	515	435	535	0,96	0,9	1	0,86

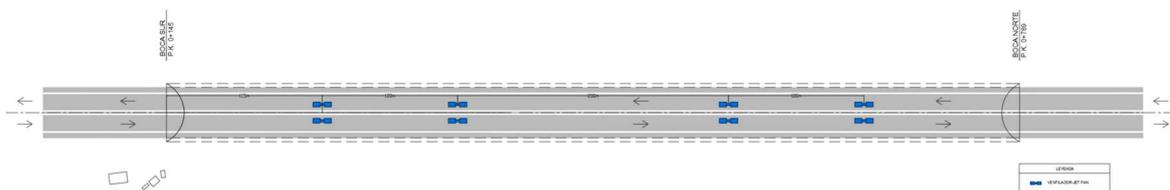


Figura 3.20. Localización ventiladores. Fuente: elaboración propia

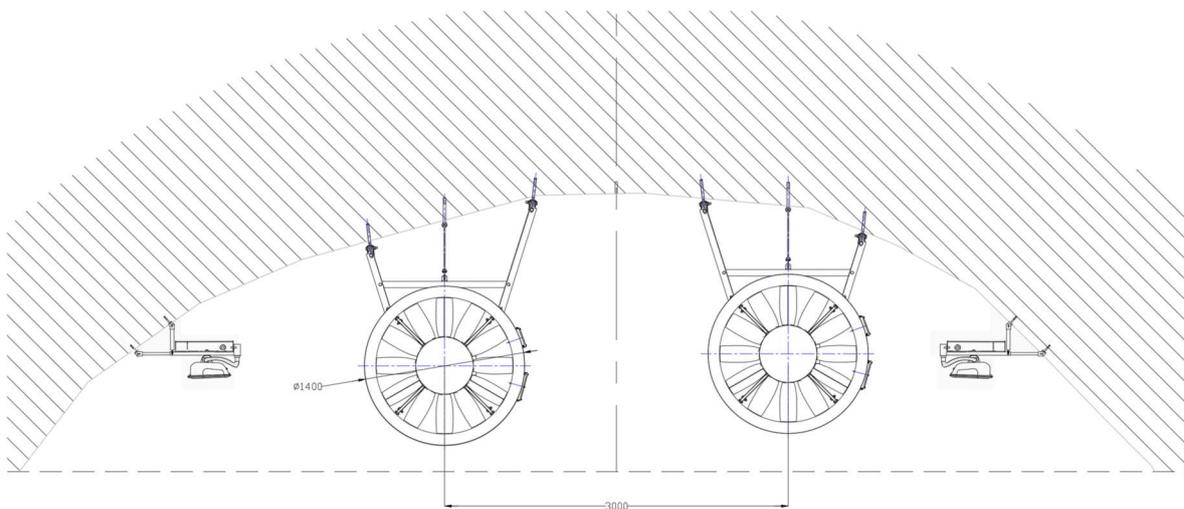


Figura 3.21. Posicionamiento de los ventiladores. Fuente: elaboración propia a partir de catálogo de fabricante

En principio, el sentido de los ventiladores para el diseño de la ventilación vendrá determinado por la localización del incendio del túnel, ya que el tráfico dentro del túnel es bidireccional. Sin embargo, hay que tener en cuenta otras variables, a la hora del funcionamiento del sistema de ventilación: número de vehículos en cada lado del incendio, viento en boca, etc. Por lo tanto, la ventilación del túnel que se ha diseñado tiene que ser

capaz de controlar completamente un incendio y poder ventilar, por lo menos, hacia la boca más cercana, teniendo viento en contra de 5 m/s.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con los criterios de dimensionamiento recogidos anteriormente para los tres modelos de ventiladores.

Si el empuje generado por los ventiladores es superior al empuje generado por el sumatorio de las pérdidas de carga, cumple, si no, en dicha posición el sistema de ventilación no es capaz de tener un control de los humos y evitar que se produzca un retroceso de los mismos:

1. Modelo 1: JZ 12-37/4: Potencia del ventilador: 37 kW (Tabla 3.34).
2. Modelo 2: JZ 12-45/4: Potencia del ventilador: 45 kW (Tabla 3.35).
3. Modelo 3: JZ 12-55/4: Potencia del ventilador: 55 kW (Tabla 3.36).

1. **Modelo 1: JZ 12-37/4: Potencia del ventilador: 37 kW**

Tabla 3.34. Resultados de los cálculos para la ventilación (Potencia ventilador:37 kW). Fuente: elaboración propia

Resultados de los cálculos para la ventilación											
% túnel	Posición incendio (m)	Empuje (Pa)		Empuje (N)		Margen (Vent/Nec)				Nº ventiladores	
		Requerido (Pa)	Ventilad. (Pa)	Requerido (N)	Ventilad. (N)	Margen (N)	Margen (Pa)	Margen (%)	Cumple	Instalados	Disponibles
50%	315	104,55	96,16	7606,26	6995,89	-610,37	-8,39	-8,02%	NO OK	8	8
55%	347	102,48	79,62	7455,45	5792,11	-1663,34	-22,86	-22,31%	NO OK	8	6
60%	378	100,20	79,28	7289,83	5767,27	-1522,56	-20,93	-20,89%	NO OK	8	6
65%	410	97,87	78,93	7119,71	5742,29	-1377,42	-18,93	-19,35%	NO OK	8	6
70%	441	95,06	94,08	6915,52	6844,66	-70,85	-0,97	-1,02%	NO OK	8	6
75%	473	92,58	94,08	6735,54	6844,66	109,12	1,50	1,62%	OK	8	6
80%	504	90,05	94,08	6550,97	6844,66	293,69	4,04	4,48%	OK	8	6
85%	536	87,01	125,45	6329,80	9126,22	2796,42	38,44	44,18%	OK	8	8
90%	567	84,33	125,45	6135,18	9126,22	2991,04	41,11	48,75%	OK	8	8
95%	599	81,59	125,45	5935,89	9126,22	3190,33	43,85	53,75%	OK	8	8
100%	630	78,28	125,45	5695,13	9126,22	3431,09	47,16	60,25%	OK	8	8

2. Modelo 2: JZ 12-45/4: Potencia del ventilador: 45 kW

Tabla 3.35. Resultados de los cálculos para la ventilación (Potencia ventilador:45 kW). Fuente: elaboración propia

Resultados de los cálculos para la ventilación											
% túnel	Posición incendio (m)	Empuje (Pa)		Empuje (N)		Margen (Vent/Nec)				Nº ventiladores	
		Requerido (Pa)	Ventilad. (Pa)	Requerido (N)	Ventilad. (N)	Margen (N)	Margen (Pa)	Margen (%)	Cumple	Instalados	Disponibles
50%	315	104,55	109,78	7606,26	7986,44	380,17	5,23	5,00%	OK	8	8
55%	347	102,48	90,83	7455,45	6607,66	-847,80	-11,65	-11,37%	NO OK	8	6
60%	378	100,20	90,44	7289,83	6579,51	-710,32	-9,76	-9,74%	NO OK	8	6
65%	410	97,87	90,05	7119,71	6551,20	-568,51	-7,81	-7,99%	NO OK	8	6
70%	441	95,06	107,22	6915,52	7800,46	884,94	12,16	12,80%	OK	8	6
75%	473	92,58	107,22	6735,54	7800,46	1064,91	14,64	15,81%	OK	8	6
80%	504	90,05	107,22	6550,97	7800,46	1249,48	17,18	19,07%	OK	8	6
85%	536	87,01	142,96	6329,80	10400,61	4070,81	55,96	64,31%	OK	8	8
90%	567	84,33	142,96	6135,18	10400,61	4265,43	58,63	69,52%	OK	8	8
95%	599	81,59	142,96	5935,89	10400,61	4464,72	61,37	75,22%	OK	8	8
100%	630	78,28	142,96	5695,13	10400,61	4705,48	64,68	82,62%	OK	8	8

3. Modelo 3: JZ 12-55/4: Potencia del ventilador: 55 kW

Tabla 3.36. Resultados de los cálculos para la ventilación (Potencia ventilador:55 kW). Fuente: elaboración propia

Resultados de los cálculos para la ventilación											
% túnel	Posición incendio (m)	Empuje (Pa)		Empuje (N)		Margen (Vent/Nec)				Nº ventiladores	
		Requerido (Pa)	Ventilad. (Pa)	Requerido (N)	Ventilad. (N)	Margen (N)	Margen (Pa)	Margen (%)	Cumple	Instalados	Disponibles
50%	315	104,55	126,25	7606,26	9185,03	1578,76	21,70	20,76%	OK	8	8
55%	347	102,48	104,39	7455,45	7594,37	138,92	1,91	1,86%	OK	8	6
60%	378	100,20	103,95	7289,83	7562,22	272,40	3,74	3,74%	OK	8	6
65%	410	97,87	103,50	7119,71	7529,90	410,19	5,64	5,76%	OK	8	6
70%	441	95,06	123,12	6915,52	8956,63	2041,12	28,06	29,52%	OK	8	6
75%	473	92,58	123,12	6735,54	8956,63	2221,09	30,53	32,98%	OK	8	6
80%	504	90,05	123,12	6550,97	8956,63	2405,66	33,07	36,72%	OK	8	6
85%	536	87,01	164,15	6329,80	11942,18	5612,38	77,15	88,67%	OK	8	8
90%	567	84,33	164,15	6135,18	11942,18	5807,00	79,82	94,65%	OK	8	8
95%	599	81,59	164,15	5935,89	11942,18	6006,29	82,56	101,19%	OK	8	8
100%	630	78,28	164,15	5695,13	11942,18	6247,05	85,87	109,69%	OK	8	8

Como resultado del proceso de cálculo se presenta una gráfica en la que se representa, para la implantación de ventiladores, el empuje aportado por los mismos (en amarillo, azul y en verde dependiendo de la potencia) frente a la demanda de empuje debido a las pérdidas de carga (rojo), siendo válidos los escenarios en los que la primera queda por encima de la segunda. Es importante tener en cuenta que, como se recoge en la Figura 3.22, el eje de abscisas representa la posición de incendio considerada (no la longitud del túnel). Como ya se ha explicado anteriormente, únicamente se representa las posiciones de incendio desde la mitad del túnel hasta el final, debido a que la estrategia de ventilación resulta exactamente igual en ambas mitades del túnel.

En la gráfica (Figura 3.22), también se han representado con puntos negros, próximos al eje de abscisas, la ubicación de los equipos de ventilación. Los dos puntos en la misma posición representan los ventiladores colocados en parejas. Los 4 ventiladores no representados son los ubicados en la primera mitad del túnel (0-320 m de la boca de entrada: 0-50% de la longitud del túnel).

Se puede observar, que se necesitará instalar un total de 8 ventiladores de 55 kW de potencia. Con 8 ventiladores de 37 kW o 45 kW no resulta suficiente para compensar el sumatorio de las pérdidas de carga presentes en ciertas posiciones de incendio (del 55%-70% de la longitud del túnel concretamente).

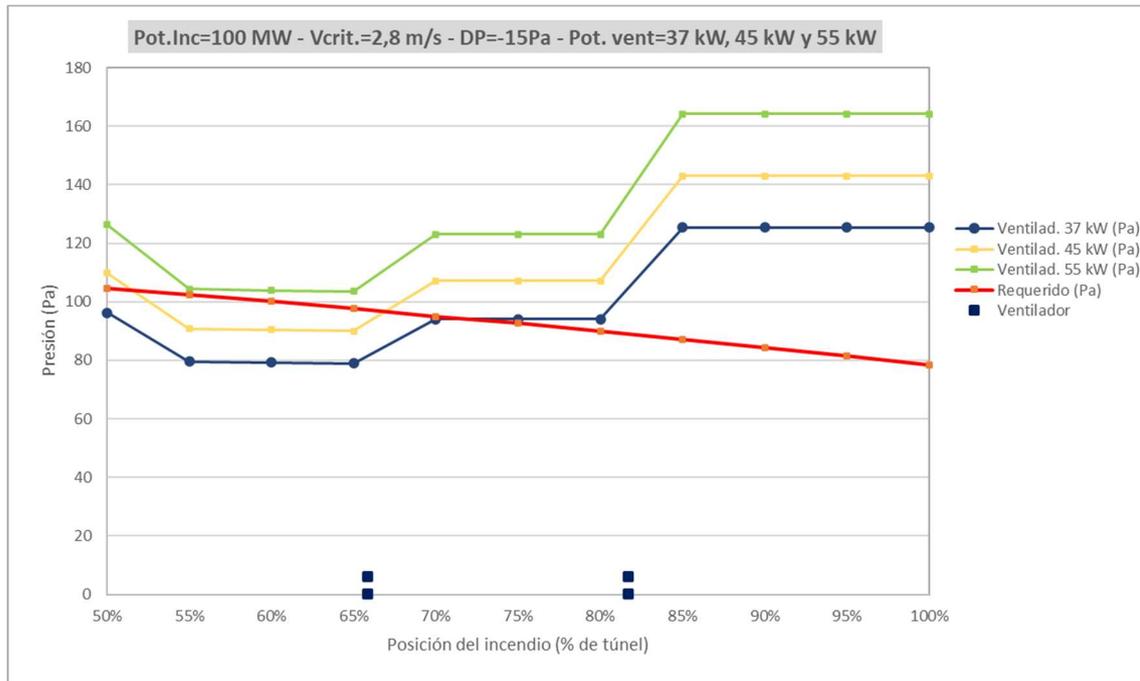


Figura 3.22. Resultados para los sistemas de ventilación propuestos. Fuente: elaboración propia

Se aporta una segunda gráfica (Figura 3.23), donde se puede visualizar el margen disponible en cada posición de incendio con los ventiladores propuestos de 55kW. La posición de incendio con menor margen, y por tanto más desfavorable de cara a un incendio es al 55% de la longitud del túnel (347 m). Esto es debido por dos motivos principales:

1. En dicha posición, con los criterios establecidos de inoperatividad de los ventiladores más cercanos al foco del incendio, únicamente se dispone de 6 ventiladores disponibles.
2. La demanda de empuje debido a las pérdidas de carga se maximiza en el centro del túnel, especialmente por la influencia del efecto chimenea.

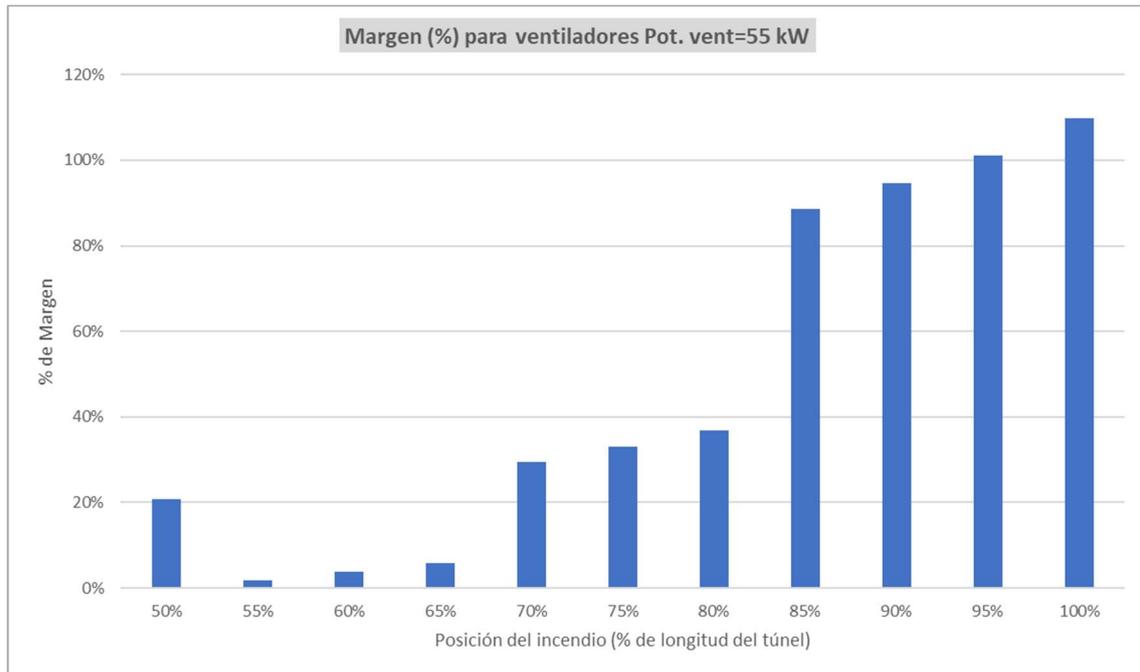


Figura 3.23. Resultados: Margen del sistema de ventilación. Fuente: elaboración propia

A partir de estas consideraciones, la cantidad total que se ha calculado es de 8 ventiladores de 55 KW, para las necesidades de ventilación de emergencia en el túnel de Erinyà.

3.3.5.7 2º MÉTODO DE CÁLCULO: CÁLCULO UNIDIMENSIONAL PARA LA VENTILACIÓN EN CASO DE UN INCENDIO

3.3.5.7.1 CONCEPTOS GENERALES

Desde el punto de vista del dimensionamiento de la ventilación es habitual emplear modelos en régimen permanente para obtener el número de equipos a instalar en el túnel. Sin embargo, desde el punto de vista de la seguridad de los usuarios en caso de incendio y llevando a cabo una evaluación con mayor profundidad que se asemeje más a la realizada, es preciso tener en cuenta la evolución temporal.

Así, de forma general, en cualquier situación de emergencia es preciso tener en cuenta no solo los tiempos de detección y de actuación del sistema de ventilación sino también el tiempo de evacuación de los usuarios. Este planteamiento se complementa desde el punto de vista de funcionamiento de la ventilación con los distintos fenómenos transitorios que tienen lugar en el túnel (detención de los vehículos, curva de crecimiento de la potencia de incendio, etc).

Para evaluar el comportamiento en régimen transitorio es posible emplear modelos de tipo unidimensional, donde se incluyen los efectos transitorios de parada de vehículos y curva de incendio.

Se analizará posteriormente el comportamiento de los usuarios, combinándolo con los resultados obtenidos en el modelo unidimensional en régimen transitorio.

Así, la velocidad del aire de ventilación en el interior del túnel se calcula para cada instante de tiempo admitiendo como hipótesis que los efectos de la compresibilidad del aire pueden despreciarse y combinando las ecuaciones del movimiento para cada sección suponiendo la continuidad de la presión y el caudal.

Para esta parte del estudio se ha empleado el software CAMATT, desarrollado por el CETU, que cuenta con las siguientes características principales:

- Se trata de un programa específico para llevar a cabo simulaciones de fuego en túneles mediante modelos unidimensionales.

- Es una herramienta validada y ampliamente contrastada.
- Incluye equipamiento del túnel, como aceleradores, ventilación cruzada, inyectores, etc,
- El modelo físico tiene en cuenta numerosos fenómenos como el efecto pistón debido a los vehículos, o el calentamiento de las paredes del túnel durante la simulación del incendio
- Resuelve ecuaciones de conservación transitorias no isotérmicas que describen la evolución de los parámetros físicos principales en la sección del túnel (temperatura, presión, velocidad del aire).

Se han considerado la curva de incendio que alcanza una potencia de 100 MW, propuesta por la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la R.C.E. (MARTE), tal y como se ha indicado anteriormente:

Tiempo (min)	Potencia (MW)
0	0
10	100
70	100
90	0

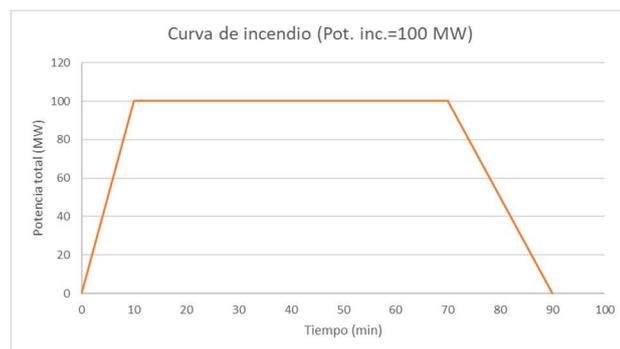


Figura 3.24. Curva de incendio considerada en CAMATT. Fuente: elaboración propia

En la siguiente figura se muestra el modelo del túnel de Erinyà desarrollado con esta herramienta:

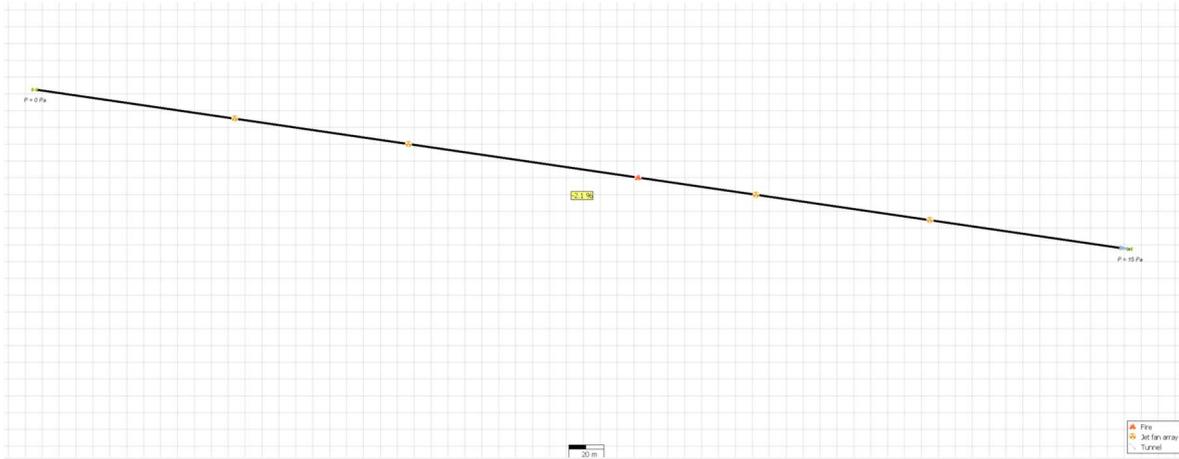


Figura 3.25. Modelo unidimensional del túnel de Erinyà. Software: CAMATT. Fuente: elaboración propia.

En el escenario considerado, se ha simulado la estrategia de ventilación adecuada para túneles bidireccionales con ventilación longitudinal, donde durante la fase de evacuación de los usuarios, se busca la estratificación de los humos. El propósito de esta estrategia es mantener el mayor tiempo posible la zona del tráfico con aire fresco, para ello se ha de mantener la capa de humos estratificada en la parte superior del túnel el mayor tiempo posible.

La estrategia pasa por reducir o mantener la velocidad del aire y minimizar la turbulencia para favorecer la estratificación y la conducción de los humos y permitir la evacuación de los usuarios.

Una vez evacuado el túnel, se pasaría a la fase en la que los bomberos atacarían el fuego para lo cual es necesaria una estrategia de arrastre para la expulsión de los humos por una de las bocas del túnel.

Para conseguir este arrastre, necesitamos alcanzar una velocidad del aire en el sentido de la circulación suficiente para que no se produzca retroceso de la capa de humos (backlayering).

Para evitar que la capa de humos progrese en sentido contrario a la ventilación, el aire fresco del túnel debe avanzar como mínimo a la velocidad crítica, anteriormente calculada.

En línea con lo expuesto, la estrategia implantada en el modelo desarrollado ha sido la siguiente:

1. En los primeros minutos tras producirse el incendio se dispone de una velocidad del aire en torno a 2-3 m/s (Figura 3.27); debido principalmente a la influencia del viento exterior. Por lo tanto, en los primeros minutos, no se actúa sobre los ventiladores. Cualquier ventilador activo induce mucha turbulencia en el movimiento del aire/humo. Por ello, los ventiladores que están activos dentro de la zona llena de humo destruyen cualquier capa de humo existente y, por tanto, llenan de humo toda la sección transversal del túnel. La secuencia lógica es activar primero los ventiladores aguas arriba, seguido de una activación muy tardía de los ventiladores aguas abajo del lugar del incendio. Tal estrategia de ventilación crea una sobrepresión aguas arriba del fuego y una región de baja presión aguas abajo.
2. Se activan los ventiladores más alejados del foco del incendio (se establece el tiempo de 3 minutos). Como hipótesis de cálculo, se establece el caso más desfavorable, en el que los bomberos acceden por la boca a donde se dirige el humo por las condiciones atmosféricas iniciales.

Los ventiladores, por tanto, se activarán en sentido contrario al tiro natural y al viento exterior.

3. Se irán activando las parejas de ventiladores, de más alejadas a más cercanas, en función del movimiento de los humos, respetando siempre un decalaje entre arranques (tiempo establecido de 30 segundos), y simulando una curva de arranque de cada ventilador mediante variadores de frecuencia, para evitar una sobrecarga de la alimentación por la suma de los picos de intensidad.

Las parejas de ventiladores ubicadas a 20 metros aguas arriba del incendio, y a 80 metros aguas abajo, en sentido de la corriente de aire, se consideran destruidas por el incendio, y, por lo tanto, inoperativas.

Por lo tanto, tomando para estudio la posición de incendio que ha resultado más desfavorable en el cálculo anterior (al 55% de la longitud del túnel), la secuencia de activación implantada en el software de cálculo es la siguiente (Tabla 3.37).

Para realizar esta simulación, se parte de que los ventiladores están detenidos en momento de producirse el incendio, al suponerse el tráfico fluido.

POSICIÓN DEL INCENDIO: A 347 m de la boca de entrada (Boca Sur)

Tabla 3.37. Secuencia de arranque de ventiladores. Fuente: elaboración propia

PAREJA N.º	Control	Distancia a boca entrada (m)	Hora	Minuto	Segundo	Factor corrector Curva de arranque
1	ON	115 m	0	0	0	0
			0	3	0	0
			0	3	15	0,5
			0	3	30	1
PAREJA N.º		Distancia	Hora	Minuto	Segundo	Factor corrector
2	ON	215 m	0	0	0	0
			0	4	00	0
			0	4	15	0,5
			0	4	30	1
PAREJA N.º		Distancia	Hora	Minuto	Segundo	Factor corrector
3	OFF	415 m	0	0	0	0
			0	0	0	0
			0	0	0	0
			0	0	0	0
PAREJA N.º		Distancia	Hora	Minuto	Segundo	Factor corrector
4	ON	515 m	0	0	0	0
			0	3	30	0
			0	3	45	0,5
			0	4	0	1

En los apartados siguientes se recogen los escenarios analizados y los resultados obtenidos empleando el software CAMAT:

3.3.5.7.2 RESULTADOS OBTENIDOS

En primer lugar, mediante este tipo de modelos, es posible observar la tendencia de evolución de la velocidad en un escenario inicial en el que se supone que se ha producido un incendio en el túnel de magnitud igual a la que se ha empleado para el dimensionamiento de la ventilación, en las peores condiciones de tiro natural contempladas.

Es importante señalar que los resultados mostrados a continuación pretenden reflejar un comportamiento específico para un escenario concreto definido por la posición y condiciones de tiro más desfavorables (incendio en boca de entrada y -15Pa, respectivamente) y unas condiciones de velocidad inicial simuladas (tráfico fluido a máxima velocidad) pero la evolución temporal podría variar para otras condiciones de contorno o iniciales.

A continuación, se analiza el resultado obtenido, tras la simulación, de la variación de los siguientes parámetros, en el transcurso del incendio:

- Evolución de la presión a lo largo del túnel
- Velocidad del aire
- Temperatura
- Visibilidad

Evolución de la presión a lo largo del túnel

En primer lugar, se presenta la gráfica de presiones en dos instantes: $t=0s$ (en rojo) y $t=270s$ (en azul). Se puede visualizar el aumento de presión en las posiciones donde se encuentra los ventiladores disponibles para este escenario:

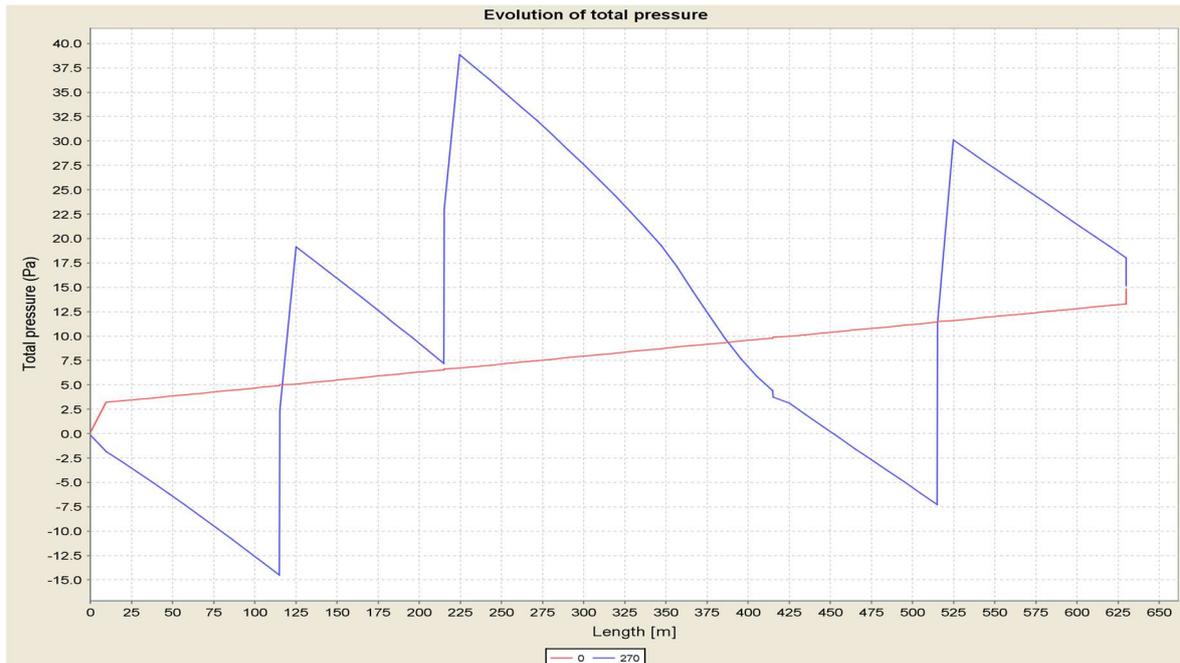


Figura 3.26. Evolución de la presión

Velocidad del aire

En las simulaciones unidimensionales mediante el software, se obtiene un cálculo más preciso. Se representa a lo largo del tiempo la velocidad del aire alcanzada en el túnel a lo largo del tiempo. Particularmente se estudia la velocidad justo en la posición anterior al incendio y se compara con la velocidad crítica calculada en el 3.3.5.2.

En la siguiente gráfica, se muestra el resultado de la velocidad del aire para el escenario de incendio estudiado:

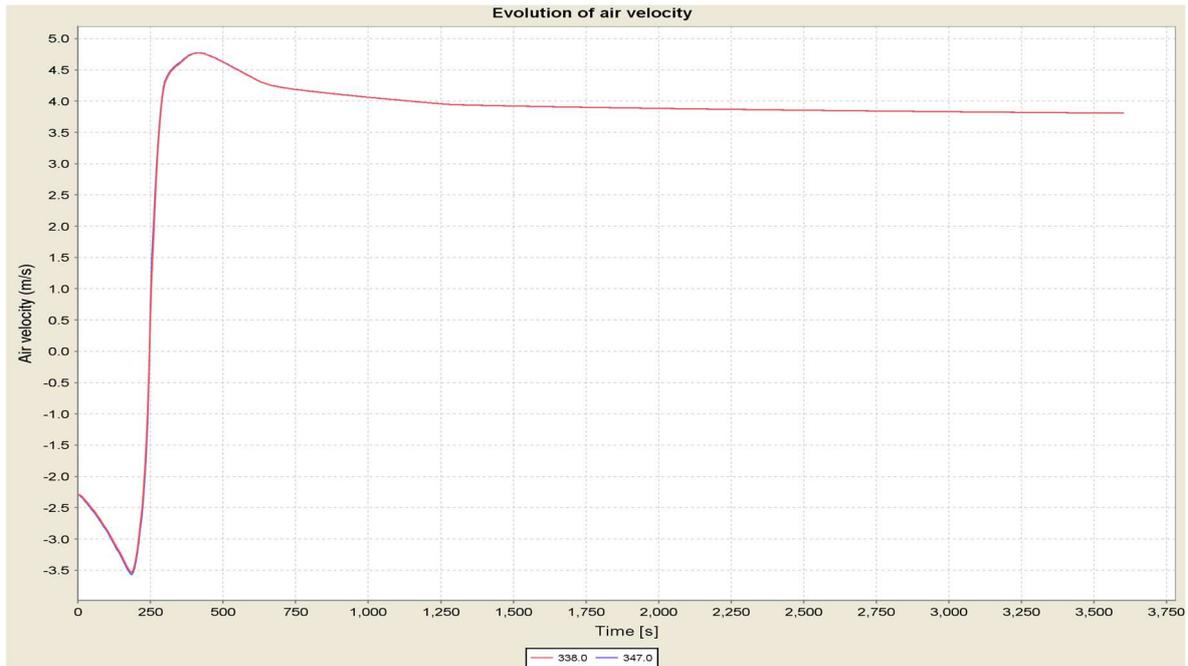


Figura 3.27. Velocidad del aire. Régimen transitorio. Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW

Como se observa en la Figura 3.27 las condiciones climáticas inducen un tiro natural en el interior del túnel en sentido contrario a la ventilación en torno a 3,5 m/s. Una vez que se arranca la ventilación (a los 3 min desde el comienzo del incendio) se consigue cambiar el sentido de la corriente de aire con una velocidad de aire superior a 4,5 m/, que va disminuyendo paulatinamente hasta que su valor queda condicionado únicamente por el empuje aportado por los 6 ventiladores disponibles para la posición de incendio estudiada.

Como era de esperar, la velocidad final del aire a los 60 minutos es considerablemente superior a los 2,8 m/s, objetivo del dimensionamiento (velocidad crítica calculada en el 3.3.5.2). Esta diferencia, del lado de la seguridad, se debe al mayor refinamiento del modelo en régimen transitorio.

A continuación, se incluye la Figura 3.28 con el gráfico de la evolución de la velocidad del aire a lo largo del túnel en función del tiempo:

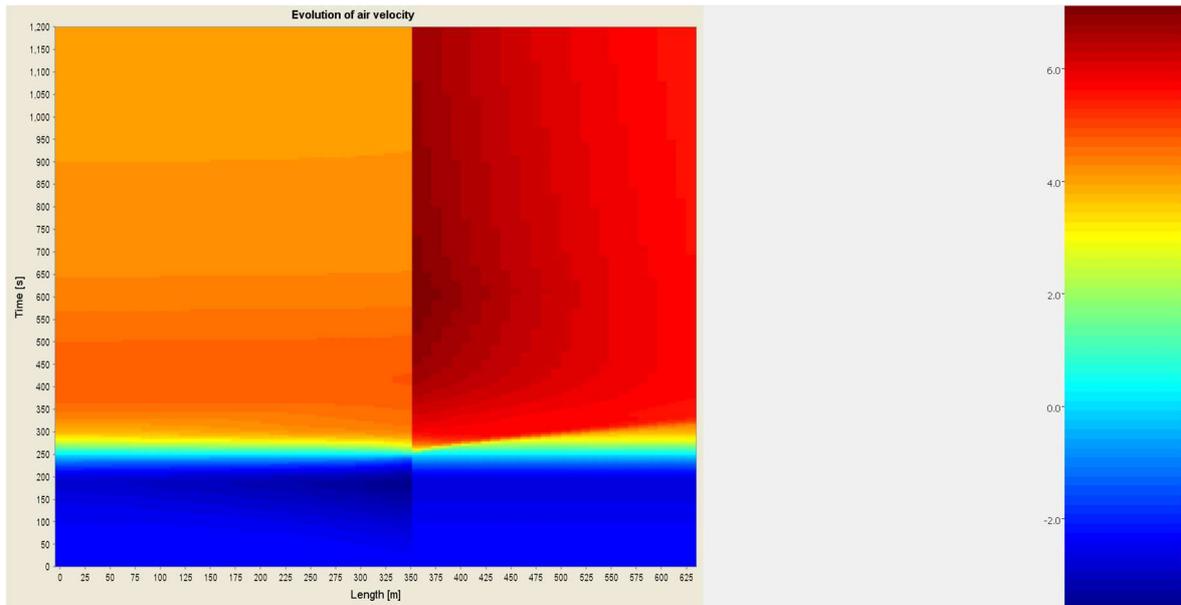


Figura 3.28. Velocidad del aire en función de la longitud del túnel y tiempo (CAMATT). Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW. Fuente: elaboración propia.

A parte de los comentado anteriormente, se puede observar que en el momento que se arrancan los ventiladores, la velocidad del aire, aguas abajo del incendio, alcanza valores superiores a 6,0 m/s. En cualquier punto del túnel se supera la velocidad crítica.

Más allá de estos resultados de validación, el modelo en régimen transitorio permite estudiar el comportamiento de la velocidad del aire si, para esta misma configuración de ventiladores, se tuviese un incendio de 200 MW, es decir, de magnitud mayor que la de estudio (100 MW).

En ese caso se obtienen los resultados mostrados en la siguiente gráfica (Figura 3.29), en la que se observa como la velocidad al cabo de los 60 min (3600 s) se encuentra en valores en torno a la velocidad de diseño y objetivo de 2,8 m/s.

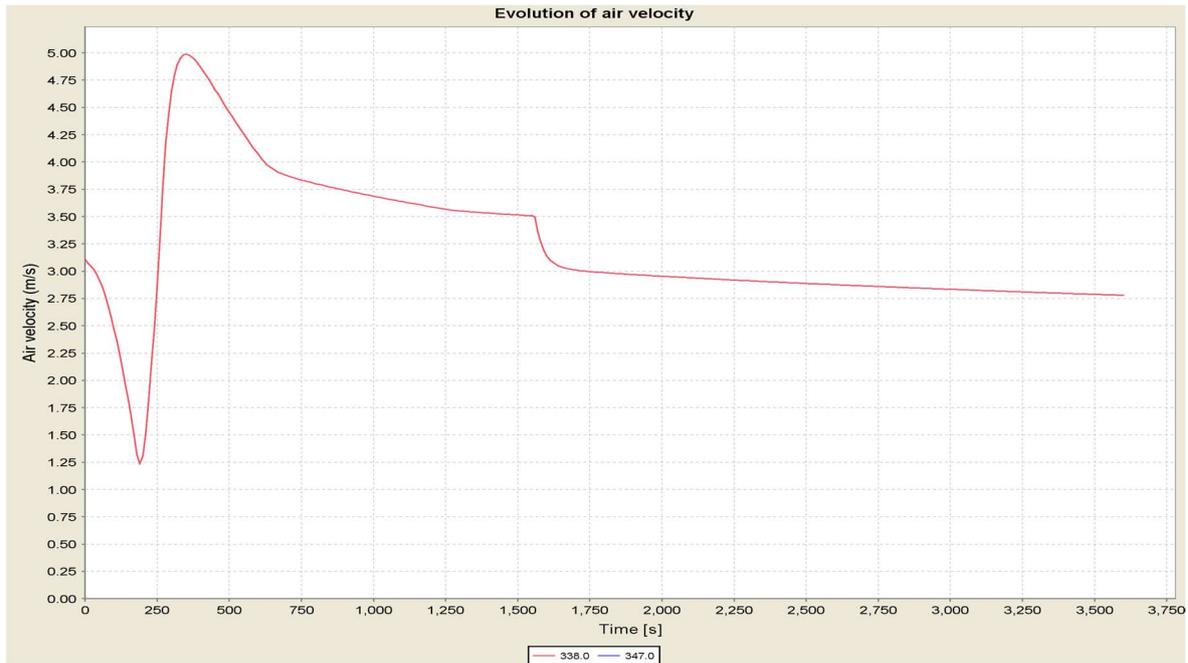


Figura 3.29. Velocidad del aire (CAMATT). Régimen transitorio. Pot.inc.:200MW. 6 vent. de 55kW. Fuente: elaboración propia.

Como se ha explicado con anterioridad, la solución de ventilación no debería permitir una velocidad inferior a 2,8 m/s. En caso de que la velocidad crítica fuese inferior a la necesaria para prevenir el retroceso de los humos se obtendría una situación similar a la que se representa a continuación:

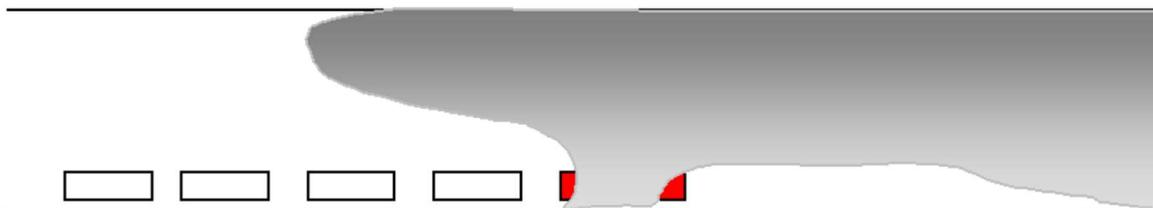


Figura 3.30. Efecto de retroceso de humos por velocidad inferior a la crítica

Es importante señalar que rara vez las instalaciones y sistemas de seguridad del túnel se proyectan para cubrir el escenario pésimo de potencia de incendio, ya que se acepta el riesgo que, cuando el fuego crece por encima de una determinada magnitud, los efectos de la radiación del foco y los humos serían tan importantes que impedirían la intervención de los servicios de emergencia.

Temperatura

A continuación, se incluye el gráfico de la evolución de la temperatura del aire a lo largo del túnel en función del tiempo:

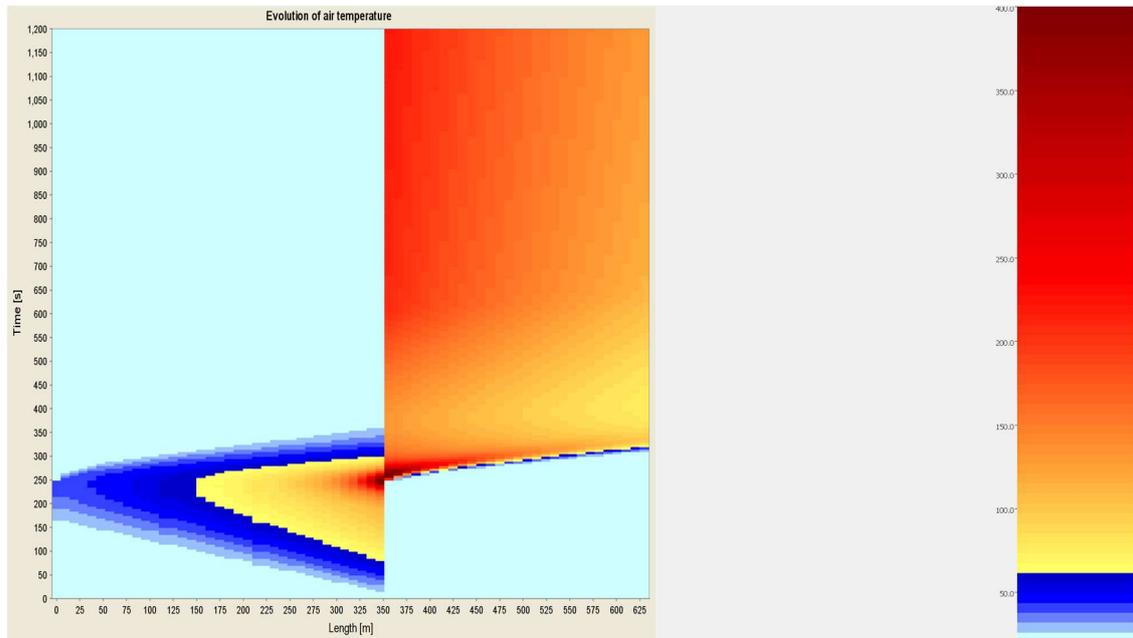


Figura 3.31. Curva de temperatura (CAMATT). Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW.
Fuente: elaboración propia.

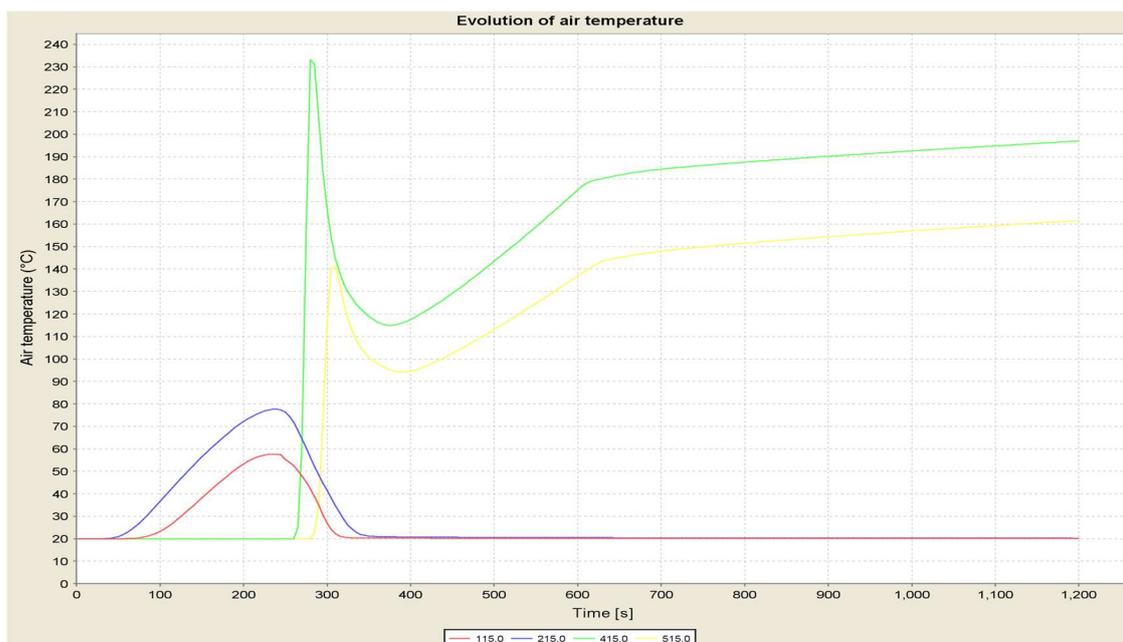


Figura 3.32. Curvas de temperatura del aire. Pos. de los ventiladores. Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW.

En los gráficos aportados (Figura 3.31 y Figura 3.32), se puede apreciar que la máxima temperatura alcanzada, a 230 °C, se presenta en la posición donde se encuentra la pareja de ventiladores n°3 (415 m), momento coincidente con el cambio del sentido del aire, tras el arranque de todos los ventiladores. Aguas abajo del incendio, la temperatura aumenta paulatinamente, no llegando a la temperatura máxima de 400 °C que soporta los modelos de ventiladores seleccionados.

En la posición donde se encuentran las parejas de ventiladores aguas arriba del incendio, se alcanzan temperaturas muy inferiores a las soportadas por los mismos.

Se puede concluir, que la hipótesis establecida de inoperatividad de los ventiladores más cercanos al incendio aguas arriba del incendio es altamente conservadora. Aun así, se mantiene de cara al dimensionamiento del sistema de ventilación, aportando un margen de seguridad adicional a la solución.

En lo que respecta al criterio de temperatura del aire como límite para una autoevacuación con éxito, la NFPA 502/2022 [19] indica que: *“C2.1. Los automovilistas no deben estar expuestos a temperaturas máximas del aire que excedan los 60 °C (140 °F) durante emergencias. Se prevé que una temperatura del aire de 60 °C (140 °F) suponga una carga fisiológica para algunos automovilistas, pero también se prevé que si la exposición es breve no produzca efectos nocivos duraderos.”*

Por lo tanto, una exposición prolongada a más de 60°C resulta difícilmente compatible con la evacuación de los usuarios. Se puede apreciar en el gráfico que los 60°C (franja de color amarillo), se alcanza en las proximidades del foco del incendio, en la zona aguas arriba del mismo, a partir de los 100 s, en función de la distancia al foco. En la zona aguas abajo del incendio, la temperatura del aire empieza a aumentar una vez que empieza a llenarse de humo esa zona, resultando en torno a los 250 s. Se puede concluir que los usuarios estarán expuestos durante un periodo muy reducido a esa temperatura límite, no afectando por tanto a su evacuación. Posteriormente se analizará con más detalle, los tiempos y trayectorias de evacuación de los usuarios en el interior del túnel.

Visibilidad

Se evalúa la propagación del humo en el túnel a lo largo del tiempo y se delimita las posibles zonas de riesgo para los usuarios durante el proceso de evacuación. Se considera el coeficiente de extinción (k) de $0,4 \text{ m}^{-1}$ como valor de opacidad en el aire a partir del cual la visibilidad en la sección del túnel se verá ampliamente comprometida.

El valor fundamental a reflejar por el modelo se corresponderá con la evolución de la opacidad del aire, en función del coeficiente de extinción (k), a lo largo del túnel y en función del tiempo. Se considera que $k = 0,4 \text{ m}^{-1}$ es un valor crítico de coeficiente de extinción para el humo en un túnel de carretera.

A continuación, se incluyen las gráficas de opacidad (tiempo-longitud) para el escenario de incendio analizado, obtenida de la simulación realizada en CAMATT:

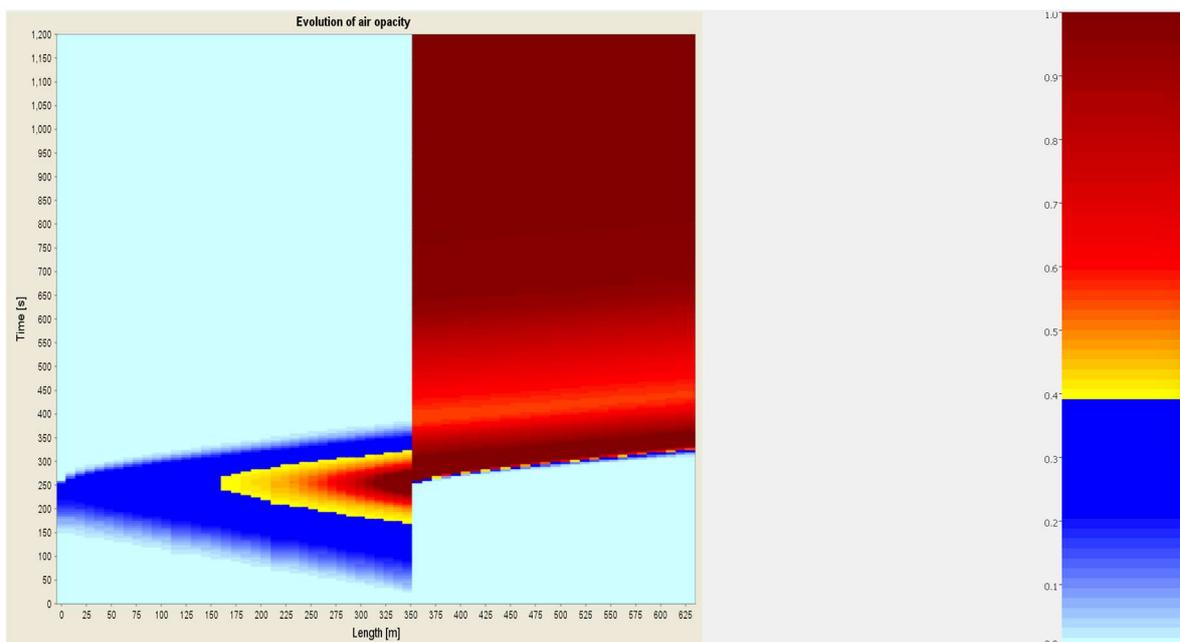


Figura 3.33. Curva de opacidad (CAMATT). Pot.inc.:100MW. 6 vent. de 55kW. Fuente: elaboración propia.

El gráfico anterior representa el coeficiente de extinción a lo largo del tiempo y del túnel. Se obtienen diferentes conclusiones:

1. **T_0 =inicio del incendio - $t_{arr.vent}=180$ s:** En la primera fase del incendio, hasta que arranca la primera pareja de ventiladores, se observa que aguas arriba del incendio se encuentra toda la sección del túnel llena de humo, con una visibilidad razonable para poder evacuar. Debido al tiro natural, aguas abajo del incendio está libre de humo.

En esta fase, se busca mantener el mayor tiempo posible la zona de tráfico (ambos lados del incendio) con aire fresco, para ello se ha de intentar mantener la capa de humos lo más estratificada posible en la parte superior del túnel.

2. **$t_{arr.vent}=180$ s - $T_{max.pot.vent}=270$ s:** En el momento que se arrancan los ventiladores, se comienza a desestratificar el humo, alcanzando niveles de opacidad por encima de $0,4 \text{ m}^{-1}$ en las zonas más próximas al foco del incendio. A los 270 s, se alcanza la máxima potencia de ventilación por los 6 equipos disponibles y se aprecia el comienzo del cambio del sentido de los humos en el interior del túnel, comenzando a aparecer humo aguas abajo del incendio.

Desde el punto de vista de los criterios de actuación, el paso de arrancar los ventiladores debe realizarse tan solo, cuando se haya producido autoevacuación de los usuarios.

Se comienza la fase de arrastre, donde se busca expulsar los humos por una de las bocas, para puedan acceder los bomberos al foco del incendio.

3. **$t_{arr.vent}=270$ s - $T_{max.pot.vent}=350$ s:** Fase de transición, donde se dispone de humo en las dos extremos del incendio, y comienza a quedar libre de humo la zona del inicio del túnel.
4. **$T_{max.pot.vent}=350$ s - $t_{final \text{ incendio}}$:** Con todos los ventiladores impulsando el humo hacia la boca de salida, aguas abajo del incendio está lleno de humo con visibilidad muy comprometida, pero la zona aguas arriba del incendio está libre de humo para el acceso de los bomberos.

Esta simulación permite comprobar que, frente al escenario más desfavorable, la ventilación del túnel es capaz de revertir el sentido del aire (tiro natural) y controlar los humos hacia un lado del incendio de tal manera que se favorezca la ventilación en ese lado del incendio y/o para que los bomberos puedan acceder al incendio.

3.3.5.8 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS DURANTE LA EVACUACIÓN EN CASO DE INCENDIO.

3.3.5.8.1 INTRODUCCIÓN

Se analiza la evacuación de las personas atrapadas en el interior del túnel de tal forma que, al combinar: la simulación del incendio (desarrollado anteriormente mediante el software CAMATT), con la simulación de evacuación de usuarios, permita el análisis de varios aspectos como:

- Afección del humo a los usuarios, mediante umbrales admisibles.
- Tiempo de recorrido de los usuarios hasta alcanzar zona segura, en este caso en concreto, al no disponer el túnel de salidas de emergencia en su interior, se debería evacuar hacia las bocas de entrada.

3.3.5.8.2 CRITERIO DE USUARIOS QUE NO PUEDEN COMPLETAR SU EVACUACIÓN

Tomando como premisa que es generalmente imposible mantener totalmente libre de humo un determinado entorno, es importante definir cuáles son las condiciones ambientales compatibles con la vida y con la capacidad de autoevacuación en caso de incendio.

Las características ópticas de humo suelen expresarse en términos de la transmitancia, densidad óptica y coeficiente de extinción. Estudios realizados relacionan el coeficiente de extinción (k) con la visibilidad de humo irritante y no irritante, apreciando relaciones empíricas asociadas a cada estudio. En la siguiente gráfica se pueden observar las ecuaciones empíricas:

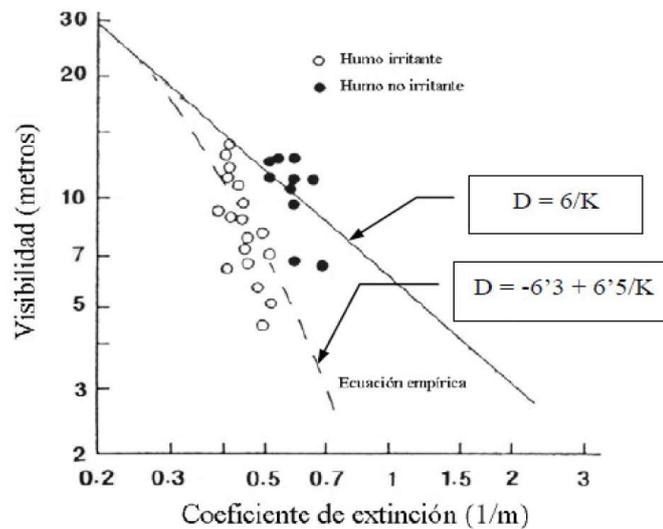


Figura 3.34. Coeficiente de extinción (1/m). Fuente: [33]

En la MARTE se considera que, todo usuario que en su fuga se encuentre en un ambiente con un nivel de opacidad de humo dado por un coeficiente de extinción $k > 0,4 \text{ m}^{-1}$, no podrá continuar la evacuación y quedará atrapado en el túnel. En base a esto, por humo irritantes, con un $k=0,4 \text{ m}^{-1}$, se obtiene una distancia de visibilidad límite de 10 m.

Dado que el criterio de visibilidad es el primero que se incumple siempre antes que el resto, en el estudio se presentan los resultados en función de la visibilidad disponible en el túnel. La visibilidad de las vías de evacuación para garantizar la autoevacuación de los usuarios será de 30 m para las señales retroiluminadas y 10 m para puertas, paredes y señales no retroiluminadas. En los resultados que se presentan a continuación se considera a este último como el caso más crítico, por lo que se adopta que visibilidades inferiores de 10 metros afectarán al proceso de evacuación de las personas.

Se considera como la altura de las personas un valor de 2 metros, valor ampliamente utilizado para este tipo de análisis y queda recogido en las diferentes normativas y guías internacionales.

3.3.5.8.3 MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE LOS USUARIOS

Para el análisis de la evacuación de los usuarios se sigue el procedimiento y premisas indicadas en el *Modelo de comportamiento de los usuarios* incluido en la MARTE [32].

Mediante dicho modelo, se determina el número de vehículos afectados, y reproduce el comportamiento de los usuarios para evacuar el túnel, una vez que se ha producido un accidente que da lugar a un incendio.

El número de personas afectadas será la suma de las que se encuentran en el túnel en el momento de producirse el accidente más las que acceden al mismo una vez se ha producido este, por desconocer lo ocurrido.

Se explica a continuación el procedimiento indicado por dicho modelo:

Para determinar el número de vehículos afectados será necesario en primer lugar obtener el número de vehículos presentes en el túnel, para lo que se contemplan dos fases

Régimen de circulación libre:

$$N = \frac{L * I}{V} \quad (3.17)$$

Ecuación 3.17. Régimen de circulación libre

Siendo:

- N: Número de vehículos presentes en túnel por carril (veh/carril).
- L: Longitud del túnel (m).
- I: Intensidad por carril de la circulación (veh/s/carril).
- V: Velocidad de circulación (m/s).

Congestión:

Cuando se produce un incendio, se supone que la circulación de los vehículos se detiene completamente desde el instante $t=0$, en el punto donde se ha producido el incendio, formándose una cola de vehículos parados. La velocidad con la que crece hacia aguas arriba del incendio la cola de los vehículos parados a partir de este punto, denominada velocidad de crecimiento de la cola de vehículos (V_c), responde a la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{I}{\frac{1}{d_0} \frac{I}{V}} \quad (3.18)$$

Ecuación 3.18. Velocidad de crecimiento de la cola de vehículos

Siendo:

- V_c = Velocidad de crecimiento o remonte de la cola de vehículos parados (m/s).
- d_0 = Interdistancia entre vehículos detenidos (m). Se adoptará, a falta de datos más precisos, la longitud del vehículo promedio (8 metros) más dos metros.
- I = Intensidad por carril de la circulación (veh/s/carril).
- V = Velocidad de circulación (m/s).

El recuento de usuarios atrapados está dado por las siguientes tasas de ocupación:

Para $n=0$: En los vehículos implicados en el incidente la ocupación es:

- Vehículo ligero: 1,5 personas/veh.lig.
- Vehículo pesado: 1 persona /veh.pes.
- Autocar/autobús: 30 personas/autocar.

Para $n \geq 1$: En los vehículos no implicados en el incidente la ocupación P es:

$$P = veh_{total} \times \left(1 - \frac{\%VP}{100}\right) \times tasa_{VL} + veh_{total} \times tasa_{VP} \quad (3.19)$$

Ecuación 3.19. Ocupación de los vehículos no implicados en el accidente

Respecto a la modelización de la evacuación de los usuarios implicados y no implicados en el incidente, se ha seguido la formulación y procedimiento indicado en el Modelo de la MARTE, y se ha programado la formulación en Microsoft Excel.

Los valores del tiempo de reacción de los usuarios, así como la velocidad de desestratificación del humo se ven condicionados por el equipamiento del túnel, tal y como se indica en la propia Metodología.[32]

3.3.5.8.4 INTERPRETACIÓN DE LAS SALIDAS GRÁFICAS

En este apartado se da una breve descripción de la salida gráfica que proporciona la aplicación de los algoritmos y datos establecidos en el Método de la MARTE.

La obtención del número de usuarios, afectados por el incendio del escenario planteado, se realiza a través de la aplicación simultánea de los modelos de ventilación y de comportamiento de los usuarios descritos en los apartados anteriores. Los resultados numéricos de la aplicación de dichos modelos recogen el número de trayectorias de autoevacuación y el número de personas atrapadas para el escenario de incendio contemplado.

Estos resultados numéricos vienen acompañados de unos gráficos obtenidos en Microsoft Excel, en los que se muestran los valores de opacidad del aire dentro del túnel en función del tiempo y del espacio, y las trayectorias de huida de los usuarios, tanto de los implicados directamente en el accidente como de los no implicados.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de los gráficos de resultados que aparecen en los posteriores apartados. En esta figura se pueden observar las siguientes partes de las que constan dichos gráficos:

- Gráfica de la opacidad del aire, medida por el valor del coeficiente de extinción k (m^{-1}).
- Límite de opacidad del aire correspondiente a un valor de $k= 0,4 m^{-1}$.
- Escala de valores de la opacidad del aire (m^{-1}).
- Trayectorias de autoevacuación de los usuarios.

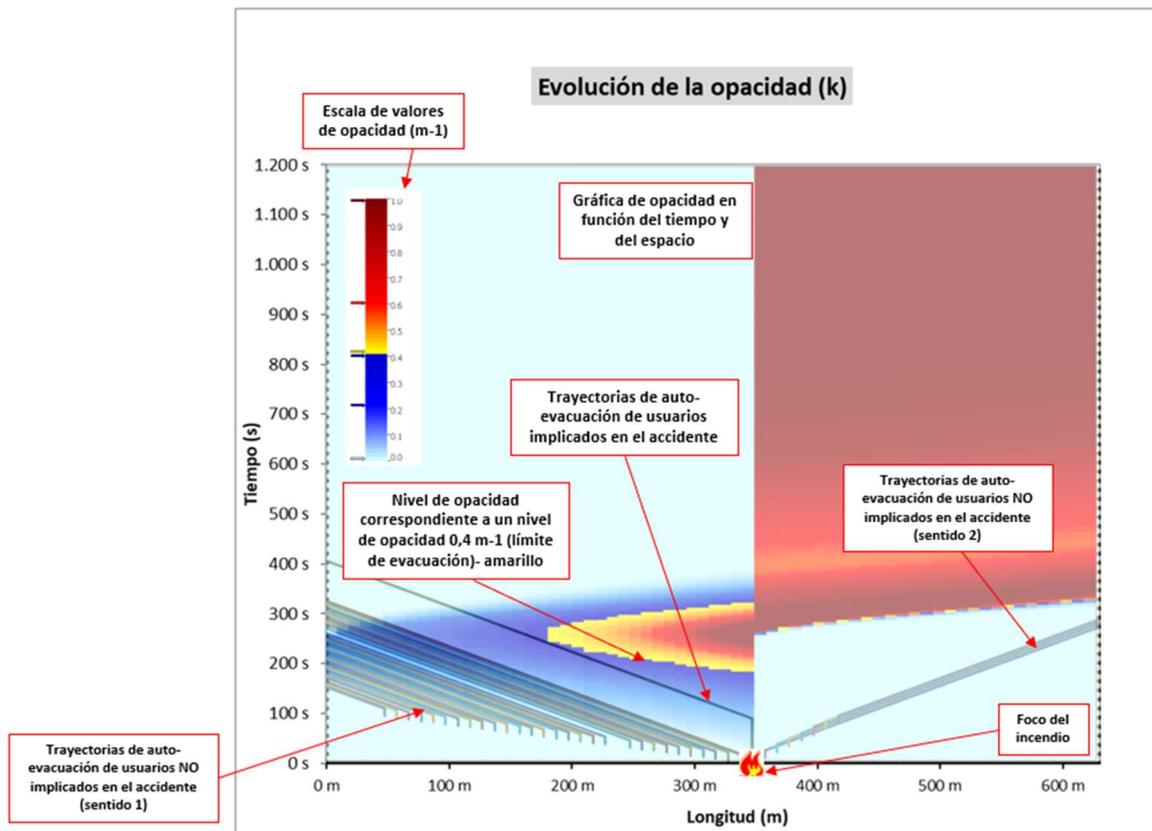


Figura 3.35. Explicación de gráfico de resultados. Modelo unidimensional de ventilación con trayectorias. Fuente: elaboración propia.

Así, en cada momento y en cada posición se conoce el estado de la atmósfera en el túnel en términos de opacidad, a partir de los ficheros generados por el modelo de ventilación: opacidad en función de distancia y tiempo (x, t) y en función de este dato, se va revisando secuencialmente cada usuario, recalculando su posición física.

3.3.5.8.5 DATOS DE PARTIDA

Se analiza la evacuación de las personas atrapadas en el interior del túnel para la posición de incendio más desfavorable calculada anteriormente, localizado al 55% de la longitud del túnel, a 347 m de la boca de entrada.

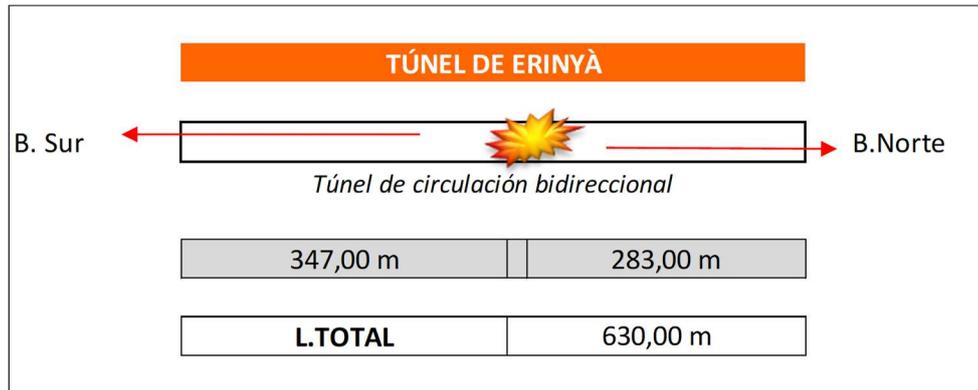


Figura 3.36. Esquema. Posicionamiento de incendio: al 55% de la longitud total

Siguiendo la metodología explicada se obtienen los siguientes resultados:

Número de vehículos presentes en el túnel

- Régimen libre:

Tabla 3.38. Régimen de circulación libre. Fuente: elaboración propia.

		Sentido 1	Sentido 2
V	Velocidad de circulación	22,2 m/s	22,2 m/s
I	Intensidad de circulación por sentido o carril	0,028 veh/s/c	0,023 veh/s/c
d	Distancia media teórica entre los parachoques delanteros de los vehículos consecutivos [$d=V/I$]	802 m	981 m
Lt	Longitud del túnel	630 m	630 m
Ltbe	Distancia entre el incendio y la boca de entrada	347,0 m	283,0 m
nc	Número de carriles del túnel	1	1
N_ccirc	Nº de vehículos en el túnel desde la boca de entrada al incendio por carril en circulación [$N_ccirc=(Ltbe*I)/V$]	0,4 veh/c	0,3 veh/c
Ncirc	Nº total de vehículos en el túnel desde la boca de entrada al incendio en circulación [$Ncirc=nc*N_ccirc$]	0,4 veh	0,3 veh

- Congestión:**Tabla 3.39. Vehículo en fase congestión. Fuente: elaboración propia.**

		Sentido 1	Sentido2
Vc	Velocidad de crecimiento o remonte de la cola de vehículos parados [$Vc = l / (1/d0 - l/V)$]	0,28 m/s	0,23 m/s
l	Intensidad de circulación por carril	0,028 m/s	
d0	Interdistancia entre vehículos detenidos (Se establece como valor promedio de 8 m + 2m)	10,0 m/s	
d	Distancia media entre los parachoques delanteros de los vehículos consecutivos [$d=V/l$]	802,4 m/s	980,7 m/s
t	Tiempo de remonte de la cola de vehículos hasta la boca de entrada	1.237 s	320 s
L*	Longitud de cola de vehículos parados que se ha formado desde el foco del incendio hacia la entrada del túnel hasta el momento en que dejan de entrar vehículos en el túnel (por sentido) [$L^* = Vc*t$].	347 m	73 m
Nc	Número de carriles del túnel. Sentido 1	1	1
N_ccong	Nº de vehículos presentes en el túnel por carril en congestión [$N_ccong=L^*/d0$].	34,0 veh/c	7,0 veh/c
Ncong	Nº máximo total de vehículos presentes en el túnel en congestión [$Ncong=nc*N_ccong$].	34 veh	7 veh
Ncong total	Nº máximo total de vehículos presentes en el túnel en congestión [$Ncong=nc*N_ccong$]. Total	41 veh	

En la Tabla 3.39, se obtiene el número máximo de vehículos presentes en el túnel que se detienen desde el instante que se produce el incendio, formando una cola de vehículo parados aguas arriba del incendio. En este caso en concreto, en el sentido 1, se obtienen 34 vehículos detenidos, y en el sentido 2, 7 vehículos. Esta diferencia se debe a que, el humo se dirige hacia la boca 2, saliendo el humo a los 340 segundos por dicha boca. En ese momento, se considera como hipótesis que no entrará ningún vehículo al túnel por la boca 2. En cambio, por la otra boca, accederán hasta que se llene de vehículos todo el túnel. Se

debe recordar que en este túnel, no se dispone de sistemas de cierre, para que el operador del Centro de control pueda efectuar un cierre efectivo del túnel en un tiempo reducido, como son las barreras exteriores, complementado con un sistema de detección automático de incidentes.

3.3.5.8.6 PROCESO DE EVACUACIÓN DE LOS USUARIOS

Para el cálculo del proceso de evacuación, es decir, el desplazamiento de los usuarios que abandonan sus vehículos y se dirigen a pie a la boca entrada, se ha considerado:

- El **tiempo de reacción** de los usuarios implicados en el accidente del escenario considerado es de **90 s**.
- El **tiempo de reacción** de los restantes usuarios afectados desde que llegan a la cola de vehículos o ven a un usuario de otro vehículo se considera de **15 s**.
- **Reducción del tiempo de reacción** (tabla 25 MARTE para todos los vehículos, excepto los accidentados. -5 s si tiene megafonía (en interior del túnel (-3 s) y galería (-2 s)), - 5 s si tiene radiocomunicaciones, -8/4 s si tiene PMV interior/externo. El túnel de Erinyà no dispone de ninguna de las instalaciones anteriormente mencionadas, por lo que se considera un tiempo de reacción de **15 s**.
- **Velocidad de autoevacuación del usuario** (tabla 25 MARTE): para todos los usuarios en el túnel. La velocidad de autoevacuación con humo estratificado es de 1,0 m/s y con humo desestratificado es 0,3 m/s. La existencia de ciertas instalaciones facilita la evacuación de los usuarios, por lo tanto si se dispone de iluminación de seguridad y emergencia (con SAI y suministro alternativo de electricidad) +0,2 m/s, señalización de salidas de emergencia y equipamiento: +0,1 m/s. Se considera que se puede mantener la estratificación en la fase de autoevacuación, por lo que se establece una velocidad de **1,0 m/s**.
- **Equipos para cierre del túnel** (tabla 25 MARTE): Los equipos para cierre del túnel están compuestos principalmente por semáforos y barreras exteriores y para ser completamente operativos deben tener una respuesta rápida tras un incidente que exija el cierre del túnel. Por ello, en los casos en que no exista centro de control, se considerará que no son operativos en tiempos cortos para realizar un cierre efectivo

del túnel. La MARTE establece los siguientes tiempos de cierre dependiendo de la existencia de ciertas instalaciones:

- Semáforos + barreras → No operativo (salvo programación)
- Semáforos + barreras + C. Control → Cierre del túnel en 4 minutos
- Semáforos + barreras + C. Control + DAI → Cierre del túnel en 3 minutos

El túnel de Erinyà no dispone de barreras para cerrar el túnel. Por lo que se considera un tiempo de cierre de 10 min. que es el tiempo promedio que tardan en llegar el personal de conservación del túnel ante una incidencia.

3.3.5.8.7 RESULTADOS

Se considera que se desarrolla siempre la evacuación en el sentido contrario al de la marcha de los vehículos (hacia atrás), ya que se entiende que los usuarios no evacuarán hacia donde está el accidente y por ende el humo.

Las distancias se representan en metros donde 0 representa la boca del túnel y el tiempo en segundos donde 0 representa el inicio del incendio.

Las gráficas que se muestran a continuación recogen sintéticamente los resultados de los cálculos efectuados. La interpretación básica de éstas ya se ha realizado en el apartado 3.3.5.8.4, de forma que a continuación se expondrán brevemente aquellos otros aspectos que completen la interpretación de las mismas.

La presencia del mayor o menor número de trayectorias, que identifican a cada uno de los vehículos presentes en el tramo de estudio, es debida por una parte a la Intensidad Media Diaria por carril y la velocidad de circulación dentro del túnel, y por otra al tiempo de cierre efectivo de túnel que se considere, ya sea éste debido a la existencia de un determinado equipamiento de control de accesos al túnel o por la salida del humo por las propias bocas del túnel.

Se ha realizado dos simulaciones: el túnel en el estado actual (sin ventilación), y considerando la ventilación propuesta en el presente estudio.

En función de todo lo anterior, se obtiene los siguientes resultados de cálculo:

Cálculo sin sistema de ventilación (estado actual del túnel)

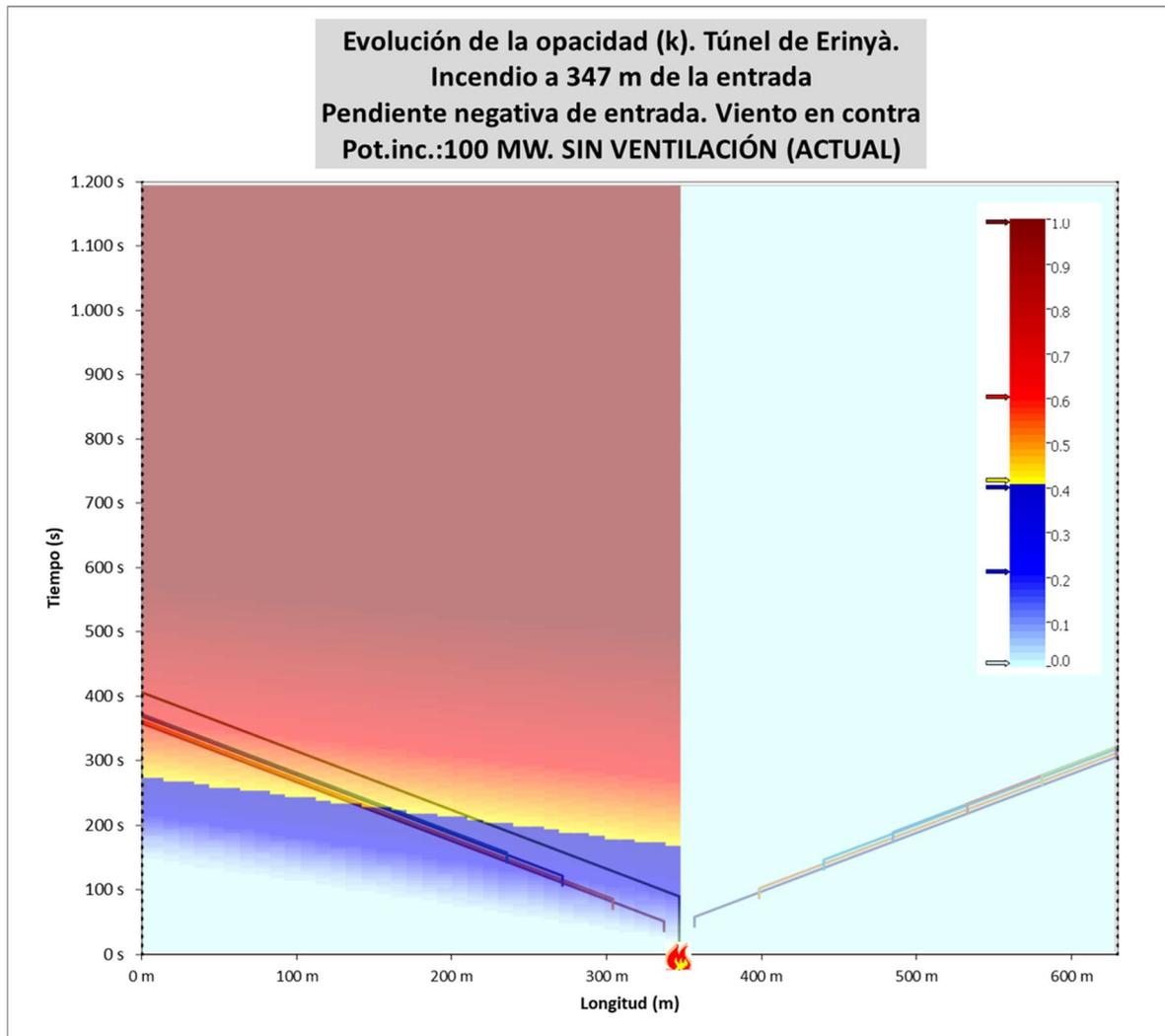


Figura 3.37. Evacuación de los usuarios con humo a 390 m de la entrada. Opacidad. Túnel sin sistema de ventilación (estado actual).

Al no disponer de ventilación mecánica, y debido a las condiciones de viento exterior y tiro natural consideradas, toda la sección del túnel aguas arriba del incendio se encuentra llena de humo. En estas condiciones, todas las trayectorias de autoevacuación cortan con el límite de opacidad establecido de $0,4 \text{ m}^{-1}$ (zona amarilla), dando lugar a que todas las personas que acceden al túnel por la boca 1 (SUR) quedan atrapadas, no pudiendo efectuar la autoevacuación de forma satisfactoria.

En cambio, los usuarios que acceden por boca norte consiguen evacuar de forma satisfactoria, al encontrarse en zona de aire limpio.

A parte de los resultados indicados, uno de los grandes inconvenientes y que no se cuantifica en estos análisis es que, al no disponer de un sistema de ventilación, no es posible disponer de un control de los humos. En la fase de acceso de los SSEE al túnel y posterior extinción del incendio, actualmente solo podrán acceder por la boca donde se disponga de unas mejores condiciones de visibilidad, pudiendo ser dar el caso que sea la boca que conlleve un mayor tiempo de llegada al foco del incendio.

Cálculo con sistema de ventilación (dimensionamiento propuesto)

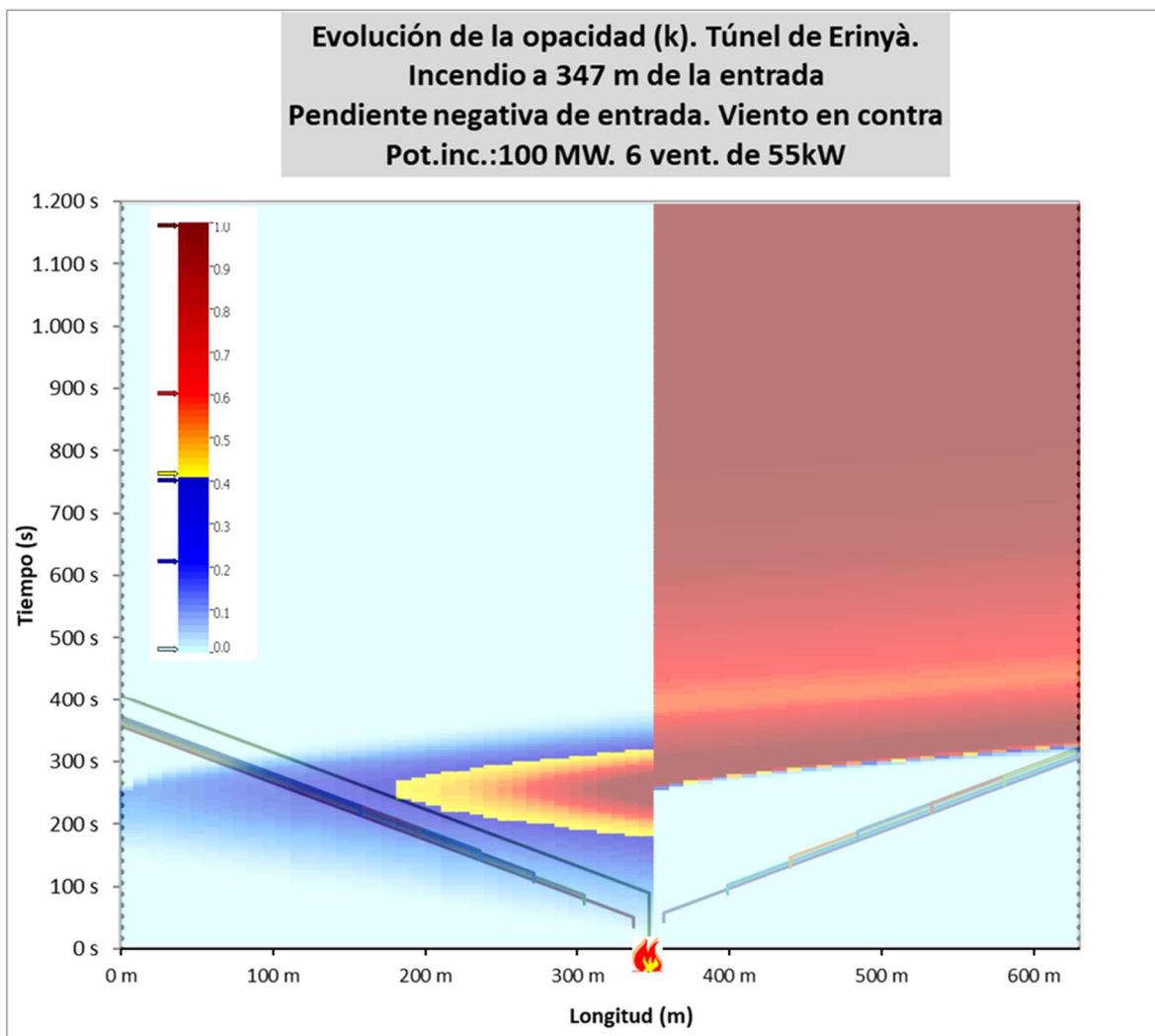


Figura 3.38. Evacuación de los usuarios con humo a 390 m de la entrada. Opacidad. Túnel con sistema de ventilación (dimensionamiento propuesto).

1. **T_0 =inicio del incendio - $t_{arr.vent}=180$ s:** En la primera fase del incendio, hasta que arranca la primera pareja de ventiladores, se observa que aguas arriba del incendio se encuentra toda la sección del túnel llena de humo, con una visibilidad razonable para poder evacuar. Debido al tiro natural, aguas abajo del incendio está libre de humo.
2. **$t_{arr.vent}=180$ s - $T_{max.pot.vent}=270$ s:** En el momento que se arrancan los ventiladores, se comienza a desestratificar el humo, alcanzando niveles de opacidad por encima de $0,4 \text{ m}^{-1}$ en las zonas más próximas al foco del incendio. A los 270 s, se alcanza la máxima potencia de ventilación por los 6 equipos disponibles y se aprecia el comienzo del cambio del sentido de los humos en el interior del túnel, comenzando a aparecer humo aguas abajo del incendio.

Desde el punto de vista de los criterios de actuación el paso de arrancar los ventiladores debe realizarse tan solo, cuando se haya producido autoevacuación de los usuarios.

3. **$t_{arr.vent}=270$ s - $T_{max.pot.vent}=350$ s:** Fase de transición, donde se dispone de humo en las dos extremos del incendio, y comienza a quedar libre de humo zonas del inicio del túnel.
4. **$T_{max.pot.vent}=350$ s - $t_{final \text{ incendio}}$:** Con todos los ventiladores impulsando el humo hacia la boca de salida, aguas abajo del incendio está lleno de humo con visibilidad muy comprometida, pero la zona aguas arriba del incendio está libre de humo para el acceso de los bomberos.

Como se puede apreciar en la gráfica (Figura 3.38), con el sistema de ventilación y estrategia propuesta, considerando las hipótesis planteadas, todos los usuarios que acceden a túnel consiguen la autoevacuación con éxito.

3.4 SUMINISTRO MEDIANTE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

3.4.1 INTRODUCCIÓN

La instalación a estudio y diseño es asimilable a una pequeña central de producción de energía eléctrica que inyectará la corriente producida por la planta solar en la red interna del túnel para su autoconsumo.

3.4.2 EMPLAZAMIENTO DE LA PLANTA FOTOVOLTAICA

En primer lugar, se han estudiado las diferentes opciones existentes para la ubicación de la planta fotovoltaica, en zonas próximas al túnel de Erinyà. Se ha realizado un primer filtro, rechazando aquellas opciones que por orientación o por limitaciones orográficas resulta más difícil su implantación y conllevan una pérdida de rendimiento de la instalación.

Las dos opciones resultantes son las siguientes:

- **Opción 1:** Cubierta del Centro de conservación de carreteras del sector L-3 de Lleida, ubicado próximo a la boca norte del túnel de Erinyà.
- **Opción 2:** Margen derecho de la carretera N-230, en sentido Norte, próxima a la boca sur del túnel de Erinyà.

Opción 1:

Esta opción se basa en la implantación de los módulos fotovoltaicos sobre la cubierta del edificio destinado al Centro de conservación de carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana del sector L-3 de Lleida (Figura 3.39).

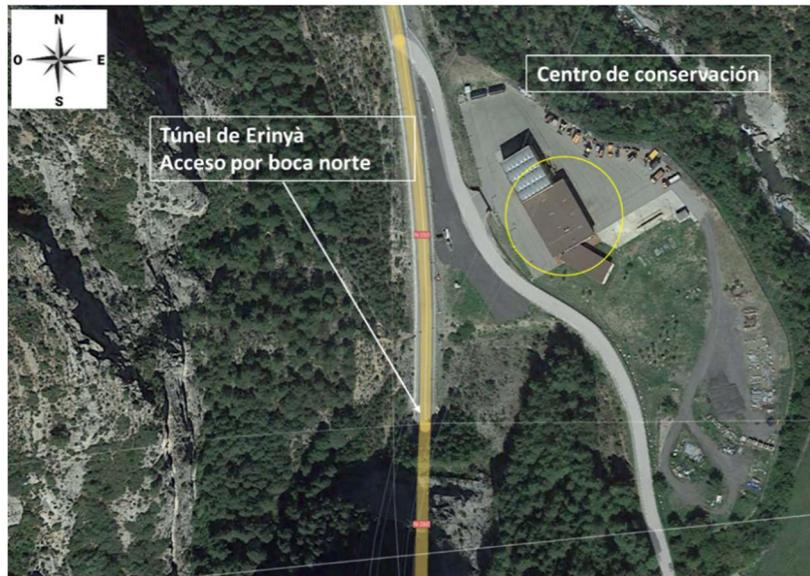


Figura 3.39. Opción 1. Ubicación planta fotovoltaica en Centro de conservación. Fuente: elaboración propia a partir de imagen aérea de Google earth

Opción 2:

Esta opción se basa en la implantación de los módulos fotovoltaicos sobre terreno, en el margen derecho de la carretera N-260 en sentido Norte, próximo a las salas técnicas de baja tensión del túnel de Erinyà, ubicadas en el acceso por boca sur (Figura 3.40).



Figura 3.40. Opción 2. Ubicación planta fotovoltaica anexa a las salas técnicas. Fuente: elaboración propia a partir de imagen aérea de Google earth

Tras el análisis de ambas ubicaciones, nos decantamos por la opción 2, por los siguientes motivos:

1. Mejores condiciones de luz solar a lo largo del día: Se ha realizado una comparativa de los niveles de irradiancia directa que se obtienen en ambas posiciones a lo largo de un día medio. A continuación, se presenta las gráficas de los resultados obtenidos para los meses de junio, julio y agosto (meses donde se prevé una mayor producción):

Los datos de irradiancia se obtienen de la página web PVGIS [34]. El enfoque de PVGIS es la investigación sobre evaluación de recursos solares, estudios de rendimiento fotovoltaico (PV) y la difusión de conocimientos y datos sobre radiación solar, muy utilizado en el cálculo de proyectos.

Las principales características de la base de datos PVGIS-5.2 son:

- Fuente: Satélite
- Período: desde 2005 hasta 2020, según la región.
- Resolución espacial: dependiendo del emplazamiento, con un valor promedio de 4 km x 4 km.
- Resolución temporal: por hora.
- Incertidumbre: dependiendo del emplazamiento, \pm 3% a 10% en promedio.

En las Figura 3.41 y Figura 3.42, se representa la irradiancia directa diaria media para los meses indicados.

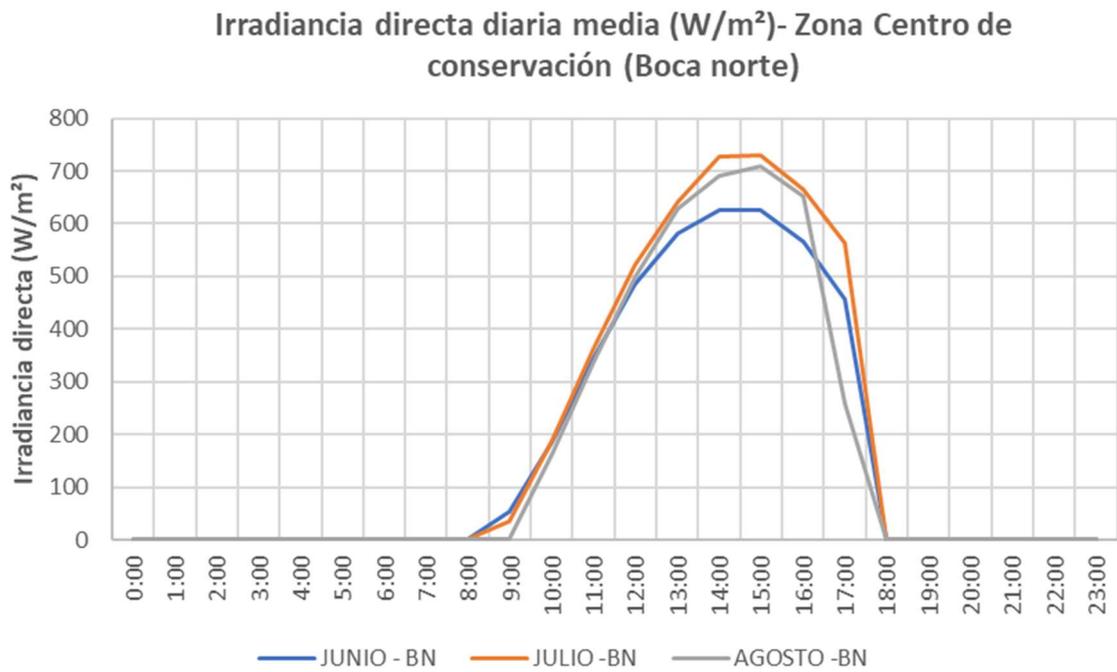


Figura 3.41. Irradiancia diaria media en zona Centro de conservación (boca norte)

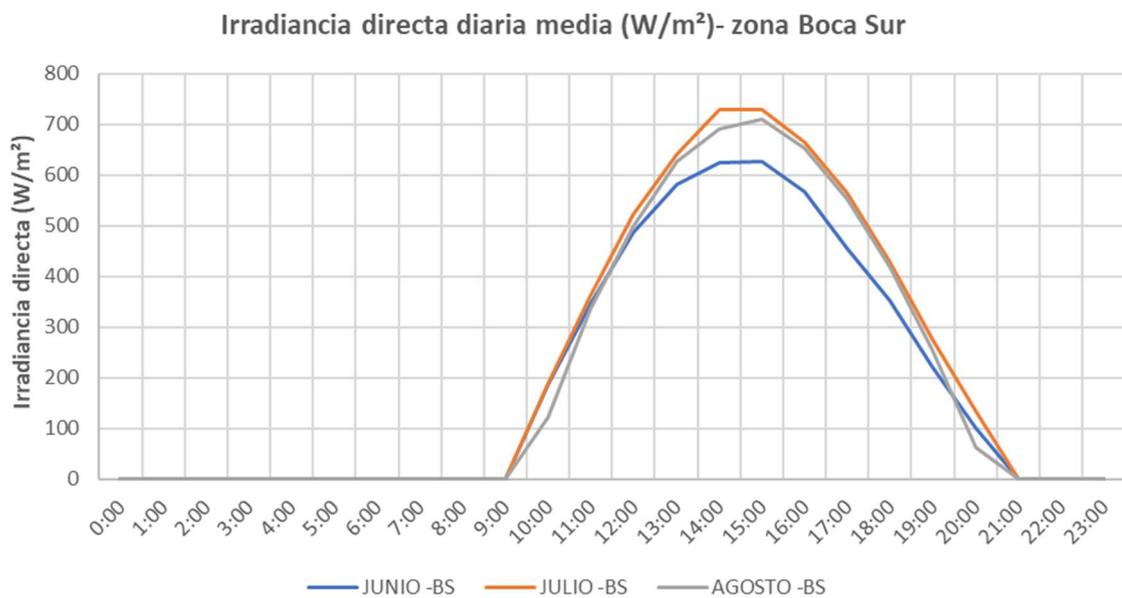


Figura 3.42. Irradiancia diaria media en zona boca sur

Nota: no se tiene en cuenta en este análisis la radiancia difusa y de albedo, con el objetivo de obtener una mejor interpretación de los resultados.

Como es normal debido a la cercanía entre ubicaciones, los valores de irradiancia son similares en ambas, pero hay un hecho que marca la diferencia a la hora de seleccionar una ubicación u otra. Como se puede apreciar, a partir de las 17h, en la zona del Centro de conservación (boca norte), la irradiancia obtenida es nula, no así en la zona de boca sur, donde hasta las 20h se obtiene luz solar. Tras analizar ambas zonas, esto se debe a que el macizo rocoso que atraviesa el túnel de Erinyà, ubicado al sur del centro de Centro de conservación (Figura 3.43), genera sombras a partir de las 17h en los meses estudiados. Este hecho se pronuncia más en el resto de los meses del año donde la sombra es más alargada debido a la menor altura solar.



Figura 3.43. Vista desde Boca norte. Macizo rocoso que atraviesa el túnel de Erinyà y Centro de conservación a su izquierda. Fuente: Google maps.

En las Figura 3.44, Figura 3.45 y Figura 3.46 , se representan las comparativa de irradiancia, entre ambas posiciones, para los tres meses indicados. Se han sombreado dos zonas en rojo y verde, en función de la pérdida o ganancia de irradiancia respectivamente en función de la franja horaria, de posicionar la instalación fotovoltaica en boca sur respecto a boca norte:

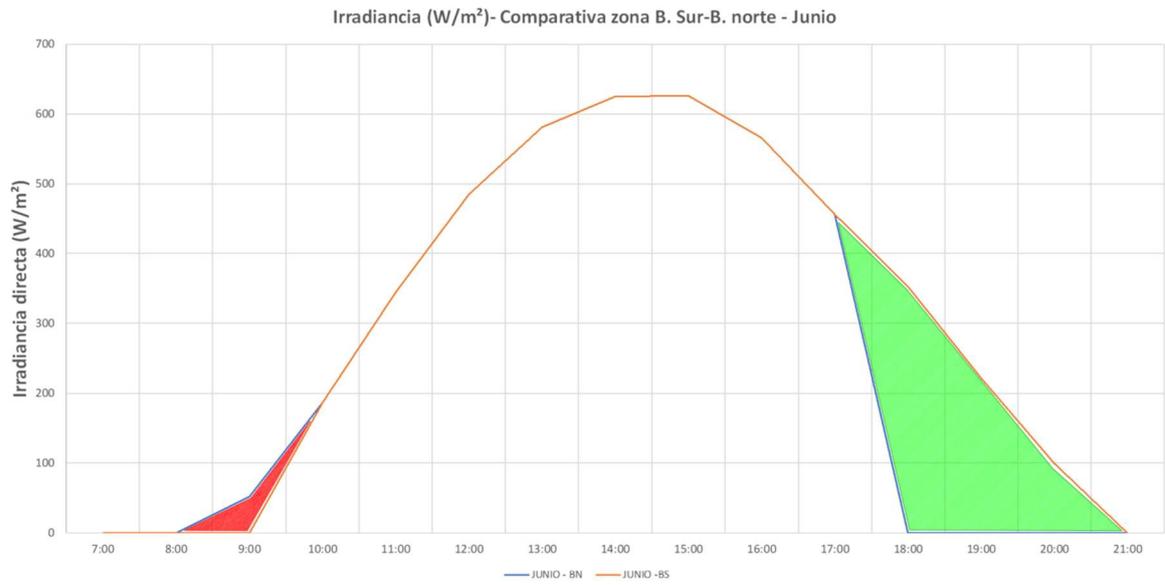


Figura 3.44. Comparativa Irradiancia en el mes de junio

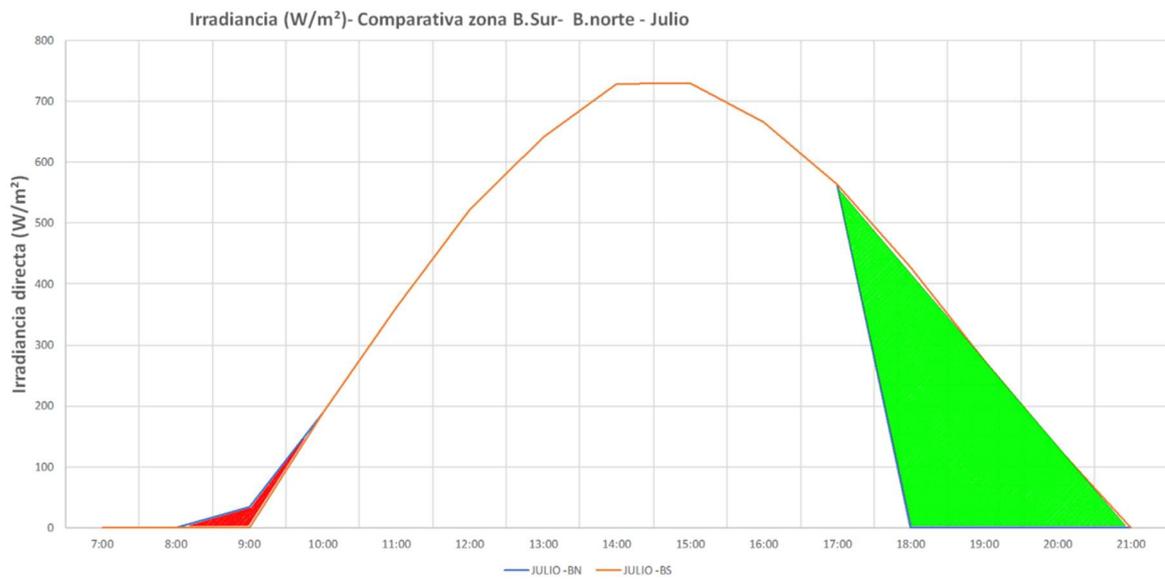


Figura 3.45. Comparativa Irradiancia en el mes de julio

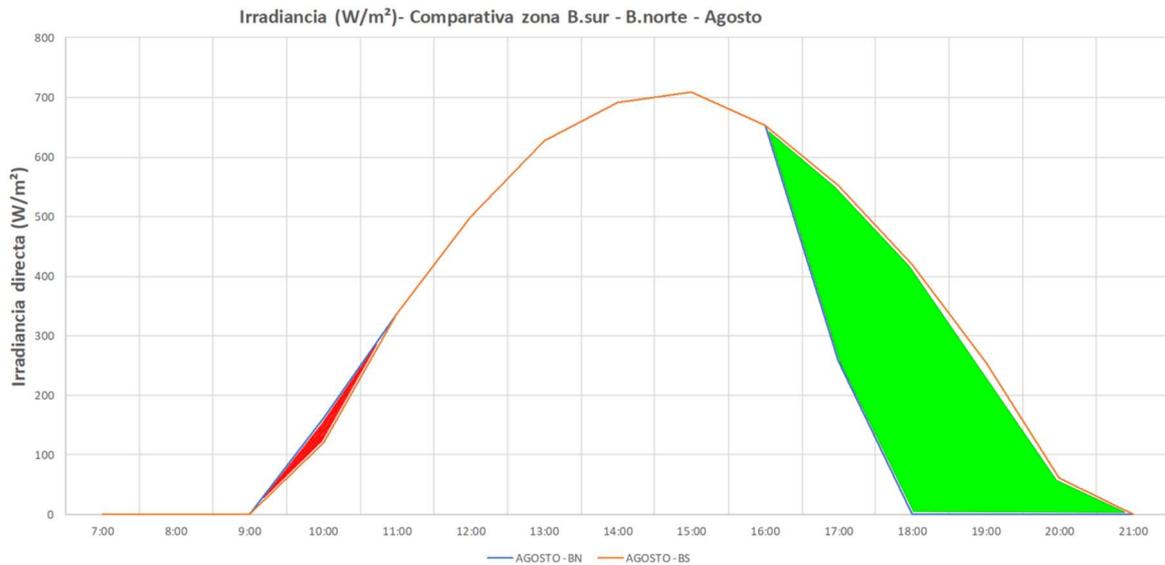


Figura 3.46. Comparativa Irradiancia en el mes de agosto

Se presenta en la siguiente tabla el tanto por ciento de aumento de irradiancia mensual recibida en la boca sur frente a la boca norte:

Tabla 3.40. Irradiancia en boca norte y boca sur del túnel (base de datos: PVGIS)[34]

Mes	Irradiancia directa media diaria (W/m ²)		
	Boca Norte	Boca sur	% diferencia entre Boca sur y Boca norte
Enero	569,99	2.629,01	361,24%
Febrero	1.963,96	3.410,66	73,66%
Marzo	3.353,53	3.755,73	11,99%
Abril	3.530,34	3.636,96	3,02%
Mayo	3.860,12	4.100,17	6,22%
Junio	3.922,59	4.544,61	15,86%
Julio	4.437,55	5.238,47	18,05%
Agosto	3.935,52	4.924,72	25,14%
Septiembre	3.955,45	4.157,27	5,10%
Octubre	2.411,76	3.436,39	42,48%
Noviembre	676,91	2.621,06	287,21%
Diciembre	381,80	2.473,99	547,98%
Total anual	1.005,01 kW/m²	1.367,61 kW/m²	36,08%

Como se puede observar en la Tabla 3.40, la radiación recibida en boca sur es considerablemente mayor a la recibida en boca norte, pronunciándose dicha diferencia en los meses de noviembre, diciembre y enero, donde prácticamente solo se recibe en boca norte radiación directa en una hora puntual del día. En términos anuales, se obtiene un 36,08% más de radiación en boca sur.

2. **Ahorro de cableado:** Es el segundo motivo por el cual se selecciona la opción 2. Está ubicación está próxima a las salas técnicas de baja tensión, donde se ubicará el inversor y al punto de conexión de compañía eléctrica. En el caso de haber seleccionado la opción 1, se debería instalar cableado desde boca norte hasta esta zona, atravesando todo el túnel (630 m).

Si bien es cierto que, aunque la zona del centro de conservación dispone de mayor superficie para ubicar los módulos fotovoltaicos, el criterio de selección establecido ha sido el de obtener el mayor rendimiento posible de la planta fotovoltaica.

Por lo tanto, según los puntos expuestos, la instalación fotovoltaica del túnel de Erinyà, se ubicará sobre terreno, en el margen derecho de la carretera en sentido Norte.

Actualmente, el espacio destinado para la instalación de los módulos fotovoltaicos está libre de obstáculos. Anexo a este espacio se encuentra las salas técnicas de baja tensión del túnel de Erinyà, donde en una de ellas se encuentran los cuadros eléctricos y el SAI, y en la otra sala técnica se encuentra un grupo electrógeno como suministro alternativo de alimentación eléctrica del túnel.

Las coordenadas de la ubicación donde se prevé situar la planta fotovoltaica son:

Tabla 3.41. Coordenadas zona instalación. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Google earth

Coordenadas zona Bosa Sur (localización de instalación FV)		
UTM	Geográficas (ETRS89)	
X UTM: 329832.52 m E	Longitud: 0°56'9.70"E	0,9360 E
Y UTM: 4683691.06 m N	Latitud: 42°17'12.75"N	42,2869 N
HUSO 31 T		

El acceso a la instalación se realiza mediante la carretera antigua N-260 (Figura 3.47).



Figura 3.47. Carretera de acceso a la zona de la instalación. Fuente: elaboración propia

3.4.3 ESTUDIO POTENCIAL SOLAR

A continuación, se muestra los datos mensuales de radiación obtenidos de una herramienta de acceso gratuito desarrollada por la NASA, dentro del proyecto Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER), el cual se inició para mejorar el actual conjunto de datos de energía renovable y crear conjuntos de datos a partir de nuevos sistemas satelitales [35].

El análisis de la radiación solar pretende proporcionar una estimación de la energía solar que la planta fotovoltaica recibiría durante un año típico.

En la Tabla 3.42, se incluye la radiación solar media diaria sobre superficie horizontal. Se incluye en la tabla la radiación mensual, extrapolándolo a partir del valor diario:

Tabla 3.42. Datos de radiación. Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de herramienta de la NASA

DESCRIPCIÓN		DATOS	
UBICACIÓN		TÚNEL DE ERINYA	
LATITUD		42,30	
LONGITUD		0,94	
Plano horizontal			
MES	Radiación diaria (kWh/m ²)	Radiación mensual (kWh/m ²)	
ENERO	2,00	62,00	
FEBRERO	2,84	79,52	
MARZO	4,01	124,31	
ABRIL	4,93	147,90	
MAYO	5,79	179,49	
JUNIO	6,67	200,10	
JULIO	6,79	210,49	
AGOSTO	6,00	186,00	
SEPTIEMBRE	4,66	139,80	
OCTUBRE	3,14	97,34	
NOVIEMBRE	2,17	65,10	
DICIEMBRE	1,70	52,70	
PROMEDIO (kWh/m ² /día)		4,23	
TOTAL (kWh/m ² /año)		1.544,75	
OTROS DATOS			
IRRADIANCIA MÁXIMA W/m ²		754,90	
IRRADIANCIA MÍNIMA W/m ²		151,01	
TEMPERATURA MÁXIMA °C		31,33	
TEMPERATURA MÍNIMA °C		-19,36	

Posteriormente, cuando se calcule la inclinación óptima a disponer los módulos fotovoltaicos se calculará la radiación prevista, a partir de los datos de radiación sobre superficie plana.

3.4.4 ANÁLISIS DE CONSUMOS

Actualmente, no se dispone de una monitorización de consumos integrada en el SCADA existente en el Centro de control del túnel. Se ha facilitado por parte de la empresa de conservación del túnel los únicos datos disponibles, siendo los consumos medios diarios del año 2022. Dichos valores son extraídos del contador eléctrico de baja tensión.

A partir de los datos facilitados, se presenta en la Tabla 3.43, los consumos por mes y el consumo total en el año 2022.

Tabla 3.43. Consumos mensuales en el túnel de Erinyà (2022). Fuente: elaboración propia

	2022	
	Consumo medio diario (kWh)	Consumo mensual (kWh)
Enero	657	20.365
Febrero	610	17.067
Marzo	629	19.494
Abril	660	19.792
Mayo	643	19.942
Junio	619	18.561
Julio	592	18.347
Agosto	578	17.920
Septiembre	543	16.294
Octubre	544	16.875
Noviembre	581	17.418
Diciembre	612	18.979
Consumo medio diario (kWh)	606	
Consumo anual 2022 (kWh)		221.054

Al no disponer de una curva de consumos diarios, se realiza una simulación de consumos.

Como ya se ha comentado anteriormente, el principal consumo energético de un túnel es se debe a la instalación de alumbrado, estando de manera general, entre un 90-95% del consumo total del túnel. Por lo tanto, se simularán y analizarán los consumos a las diferentes horas del día que soporta el túnel de Erinyà.

El túnel de Erinyà dispone de 4 niveles de iluminación (soleado, nublado, crepuscular, nocturno o permanente). Cada uno de ellos consisten en la puesta en servicio de la combinación de los circuitos de iluminación existentes. Los niveles de iluminación se activan con la combinación de los circuitos dependiendo de las condiciones de luz solar en el exterior, como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 3.44. Niveles de alumbrado en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia

Nivel de alumbrado	Circuitos activados
Nocturno	Permanente
Día crepuscular	Permanente+ Crepuscular
Día nublado	Permanente + Crepuscular + Nublado
Día soleado	Permanente + Crepuscular + Nublado + Soleado

Los diferentes niveles de iluminación se gestionan, automáticamente mediante células fotoeléctricas con los niveles calibrados conmutándose automáticamente de esta manera de un nivel a otro. Se encuentran ubicadas en la zona de boca sur, al lado de la sala técnica. Por lo tanto, estas fotocélulas detectan la iluminación exterior existente y dependiendo de esta, se activan los circuitos de alumbrados necesarias en cada momento.

Se dispone de un alumbrado exterior en el acceso al túnel por ambas bocas, que se enciende cuando los niveles de iluminación exterior están por debajo del nivel calibrado de la fotocélula correspondiente a crepuscular.

Se ha solicitado a la empresa de conservación las características de las luminarias instaladas, con el fin de obtener la potencia instalada. Los datos remitidos son los siguientes:

Tabla 3.45. Potencia instalada de las luminarias. Fuente: elaboración propia

NIVEL DE ILUMINACIÓN	UNIDADES DE LUMINARIAS			POTENCIA INSTALADA (W)
	150 W	250 W	400 W	
Nocturno o permanente	62	-	-	9.300
Crepuscular	-	16	32	16.800
Nublado	30	-	48	23.700
Soleado	-	16	80	36.000
Exterior	10	-	-	1.500
Total	102	32	160	87.300

Y como se ha explicado anteriormente sobre la conmutación de los diferentes circuitos de alumbrado en función de la luz solar (Tabla 3.44), se obtiene las siguientes potencias instaladas por nivel de iluminación:

Tabla 3.46. Potencia por nivel de iluminación. Fuente: elaboración propia

	Potencia total (W)
Exterior + Nocturno	10.800
Exterior + Nocturno + Crepuscular	26.100
Exterior + Nocturno + Crepuscular + Nublado	49.800
Exterior + Nocturno + Crepuscular + Nublado + Soleado	85.800

La obtención de una curva de consumo diario se realiza a partir de las horas de sol recibidas en la zona del túnel. Se presenta una cuadrícula en función de las horas del día y mes de los encendidos de los niveles de iluminación y la potencia instalada en cada nivel (Tabla 3.46), obteniéndose la Tabla 3.47:

Tabla 3.47. Simulación de consumos horarios en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia

Horas	CONSUMOS TÚNEL DE ERINYÀ (kWh)											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE
0	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
1	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
2	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
3	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
4	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
5	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
6	11,88	11,88	11,88	11,88	28,71	28,71	28,71	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
7	11,88	11,88	28,71	28,71	54,78	54,78	54,78	28,71	28,71	11,88	11,88	11,88
8	28,71	28,71	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	28,71	28,71	28,71
9	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78
10	54,78	54,78	54,78	54,78	94,38	94,38	94,38	94,38	54,78	54,78	54,78	54,78
11	54,78	54,78	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	54,78	54,78	54,78
12	54,78	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38
13	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38
14	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38
15	54,78	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38
16	54,78	54,78	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	54,78	54,78
17	54,78	54,78	54,78	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	94,38	54,78	28,71	28,71
18	28,71	28,71	54,78	54,78	54,78	94,38	94,38	94,38	54,78	54,78	11,88	11,88
19	11,88	11,88	28,71	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	54,78	28,71	11,88	11,88
20	11,88	11,88	11,88	28,71	54,78	54,78	54,78	54,78	28,71	11,88	11,88	11,88
21	11,88	11,88	11,88	11,88	28,71	28,71	28,71	28,71	11,88	11,88	11,88	11,88
22	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
23	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88

Se aumenta un 15% la potencia instalada, por el consumo de equipos electrónicos asociados a las luminarias.

Se representa a modo de ejemplo en la Figura 3.48 la curva de consumo para un día del mes de junio, a partir de la simulación realizada en la Tabla 3.47:

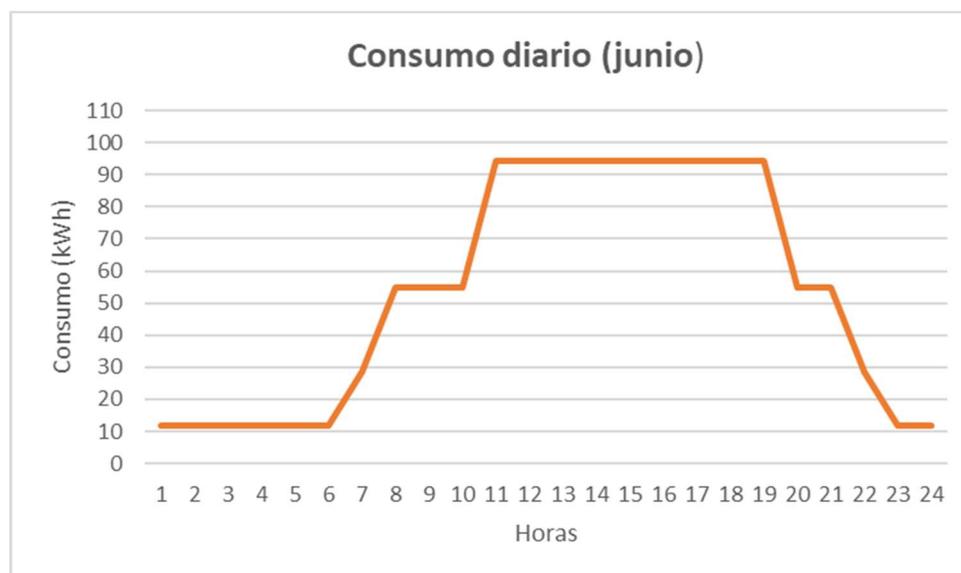


Figura 3.48. Simulación de curva diaria de consumo (ejemplo junio). Fuente: elaboración propia

A continuación, se muestran los consumos mensuales resultantes de la simulación realizada:

Tabla 3.48. Consumos mensuales a partir de la simulación de consumos horarios. Fuente: elaboración propia

	Consumo medio diario (kWh)	Consumo mensual (kWh)
Enero	784	24.306
Febrero	863	24.172
Marzo	1.028	31.877
Abril	1.111	33.323
Mayo	1.236	38.322
Junio	1.276	38.273
Julio	1.276	39.549
Agosto	1.233	38.219
Septiembre	1.111	33.323
Octubre	946	29.319
Noviembre	820	24.611
Diciembre	820	25.432
Simulación de consumo medio diario (kWh)	1.042	
Simulación de Consumo anual (kWh)		380.728

Tras la obtención de los consumos mensuales, se comparan los valores de consumos obtenidos en la simulación (Tabla 3.48) con los datos reales de consumos mensuales del

año 2022 (Tabla 3.43) aportados por la empresa de conservación. Como se puede visualizar en ambas tablas, los consumos obtenidos en la simulación son considerablemente superiores. Se presenta en la siguiente tabla, el tanto por ciento de diferencia entre ambos datos:

Tabla 3.49. Comparativa entre los valores obtenidos de consumo en la simulación y los datos reales del año 2022. Fuente: elaboración propia

	% Diferencia entre simulación y datos reales
Enero	+19,35%
Febrero	+41,63%
Marzo	+63,52%
Abril	+68,37%
Mayo	+92,17%
Junio	+106,20%
Julio	+115,56%
Agosto	+113,28%
Septiembre	+104,51%
Octubre	+73,74%
Noviembre	+41,30%
Diciembre	+34,00%
Anual	+72,06%

Se representa en la Figura 3.49 la gráfica de consumos mensuales reales de 2022 y los valores obtenidos en la simulación:

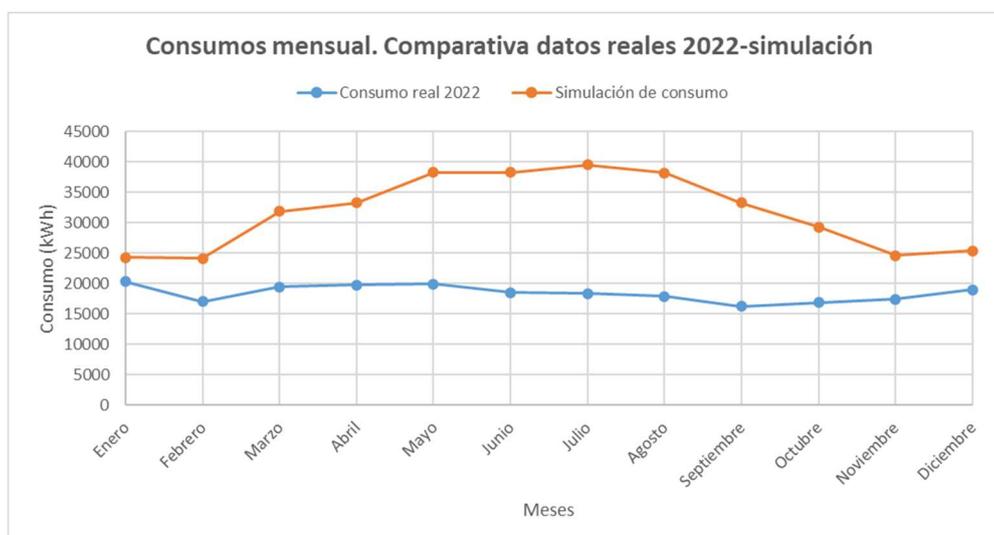


Figura 3.49. Comparativa datos reales de consumo en 2022 con simulación. Fuente: elaboración propia

Ante tal discrepancia, se realiza una consulta sobre este hecho a la empresa de conservación, y se informa que, en los últimos años, como medida de ahorro de consumo, se limita y/o regula el encendido de diferentes circuitos de alumbrado correspondientes a los niveles de soleado y nublado.

Este hecho justifica que los consumos reales no tengan prácticamente alteración a lo largo del año, cuando, actuando de manera normal, deberían ser mucho más elevados en épocas de verano, con más horas de luz solar, y por tanto mayor irradiancia.

Se concluye que, actualmente, en el túnel solo hay en funcionamiento 3 niveles de iluminación:

1. Nocturno + alumbrado exterior.
2. Crepuscular
3. Nublado (3 horas al día)

Por lo tanto, de cara al estudio de la instalación fotovoltaica, se decide realizar la curva diaria de consumos, a partir del funcionamiento real del control de la iluminación del túnel. A partir de las premisas indicadas, se obtiene una curva diaria de consumos, teniendo en cuenta únicamente los niveles de nocturno, crepuscular y nublado en el interior del túnel, y el alumbrado exterior de acceso en el exterior, resultando la siguiente curva que se muestra en la Figura 3.50:

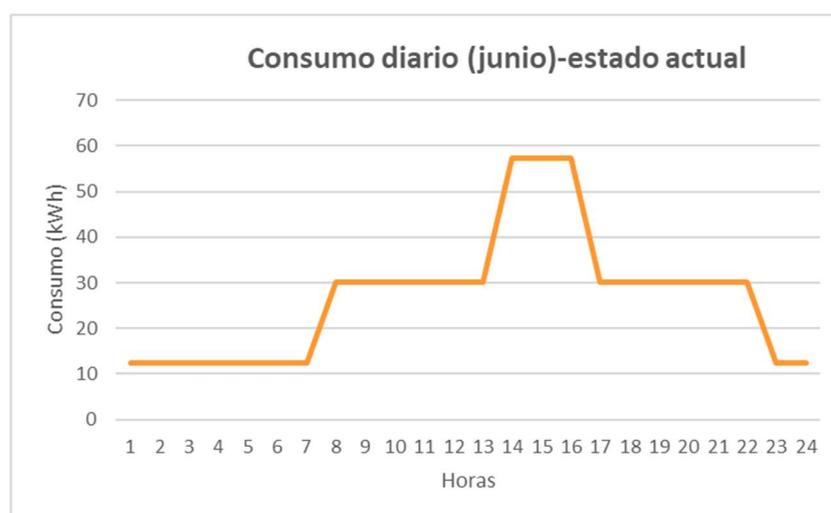


Figura 3.50. Curva diaria de consumo (estado actual). Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, la cuadrícula resultante de consumo mensual, en función de las horas del día y de los circuitos de alumbrado disponibles es:

Tabla 3.50. Simulación de consumos horarios a partir de los circuitos de alumbrado disponibles en el túnel de Erinyà. Fuente: elaboración propia

CONSUMOS REALES TÚNEL DE ERINYÀ (kWh)												
Horas	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
1	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
2	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
3	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
4	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
5	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
6	12,42	12,42	12,42	12,42	30,02	30,02	30,02	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
7	12,42	12,42	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	12,42	12,42	12,42
8	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02
9	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02
10	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02
11	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02
12	57,27	57,27	57,27	57,27	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	57,27	57,27	57,27
13	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27
14	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27
15	30,02	30,02	30,02	30,02	57,27	57,27	57,27	57,27	57,27	30,02	30,02	30,02
16	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02
17	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02
18	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	12,42	12,42
19	12,42	12,42	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	12,42	12,42
20	12,42	12,42	12,42	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	30,02	12,42	12,42	12,42
21	12,42	12,42	12,42	12,42	30,02	30,02	30,02	30,02	12,42	12,42	12,42	12,42
22	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
23	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42

3.4.5 MÓDULO FOTOVOLTAICO

El siguiente paso es seleccionar el módulo fotovoltaico a instalar. Para ello, en primer lugar, se analiza la superficie disponible en la zona de boca sur y la distribución posible de módulos.

En las Figura 3.51 y Figura 3.52, se puede visualizar la zona donde se prevé colocar la instalación fotovoltaica.



Figura 3.51. Zona disponible para ubicar la planta fotovoltaica. Fuente: Google maps

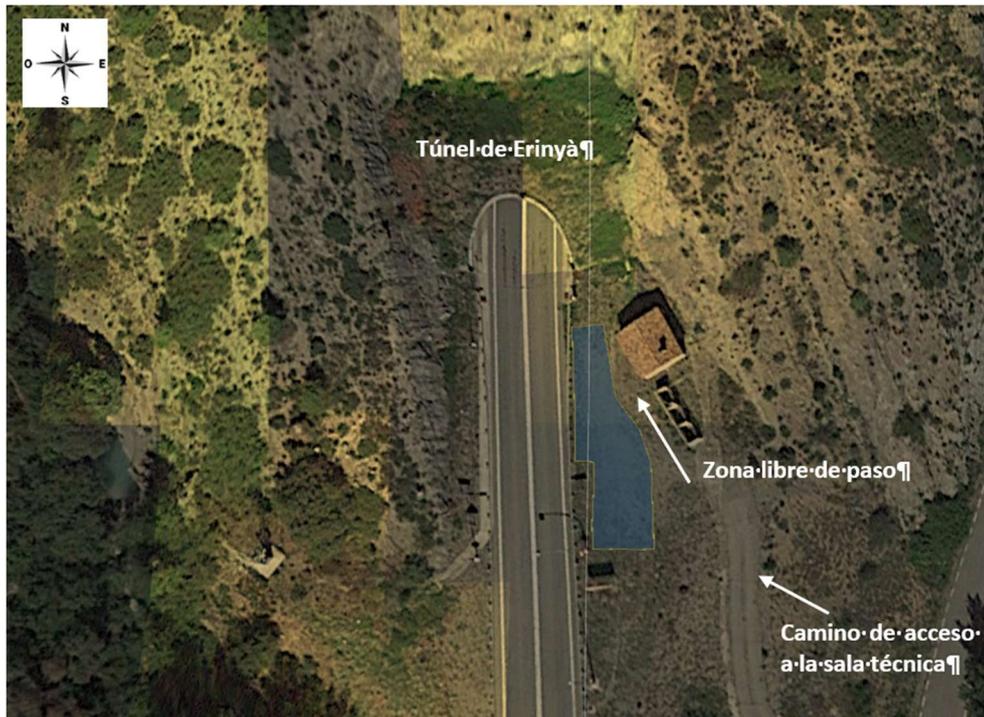


Figura 3.52. Vista aérea de la zona donde instalar la planta fotovoltaica. Fuente: Google earth

Atendiendo a la superficie disponible, se colocarán el máximo número de módulos fotovoltaicos en dicha zona. Se ha dejado una zona libre de paso a las salas técnicas para el personal de mantenimiento.

Se dispone, por tanto, de una superficie para la instalación de módulos fotovoltaicos de 177,6 m².

A la hora de seleccionar el módulo fotovoltaico idóneo, se debe tener en cuenta diferentes características propias, tales como:

- Potencia pico: potencia máxima que puede generar un módulo en las condiciones estándar de medida (STC), que son: 25°C de temperatura y 1000W/m² de radiación.
- Tensión de máxima potencia: tensión correspondiente al punto de máxima potencia.
- Tensión de circuito abierto: máxima tensión que puede proporcionar el módulo si se dejan sus terminales de circuito abierto (módulo generando corriente eléctrica sin estar conectado a ningún tipo de carga).

- Intensidad de cortocircuito: máxima corriente que va a ser capaz de proporcionar el módulo fotovoltaico cuando la tensión en sus terminales es nula, $V=0$.
- Dimensiones del módulo.
- Coefficiente de temperatura de las celdas: alteración de sus propiedades eléctricas tras variación de la temperatura.

Teniendo en cuenta dichos parámetros y la superficie disponible, se selecciona un módulo fotovoltaico de altas prestaciones de 505 Wp de células monocristalinas tipo PERC del fabricante JA SOLAR, modelo JAM66S30-505/MR. Las características más relevantes se indican en la Tabla 3.51:

Tabla 3.51. Características de los módulos fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia

DESCRIPCIÓN	DATOS
MARCA	JA SOLAR
MODELO	JAM66S30-505/MR
POTENCIA (STC) [Wp]	505
CONDICIONES STC	
Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc}^*)	45,72 V
Voltaje en punto de máx. potencia (V_{mpp}^*)	38,53 V
Intensidad de cortocircuito (I_{sc}^*)	14,00 A
Temperatura de celda (T_c)	25,00 °C
CONDICIONES NOCT	
Nominal Operation Cell Temperature NOCT	45 °C
DATOS MECÁNICOS	
Altura del módulo (H)	2.096 mm
Anchura del módulo (A)	1.136 mm
Espesor del módulo (e)	35 mm
Peso (P)	26,30 kg
Tipo de celda	Monocristalino
Nº de celdas	132(6x22)
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE LAS CÉLULAS	
Potencia	-0,350 %/°C
Intensidad de cortocircuito	+0,045 %/°C
Voltaje de circuito abierto	-0,275 %/°C
OTROS DATOS	
11BB PERC	



Figura 3.53. Módulo fotovoltaico JA SOLAR DEEP BLUE 3.0 (JAM66S30-505/MR)

Es un módulo monocristalino de 72 células partidas (Half-Cell), 144 en total. Los módulos Half-Cell (Figura 3.54), dividen el flujo de la corriente en dos partes unidas en serie. Esto reduce la resistencia interna de las placas y aseguran una producción continua cuando el módulo está parcialmente sombreado, no afectando a la totalidad del módulo.

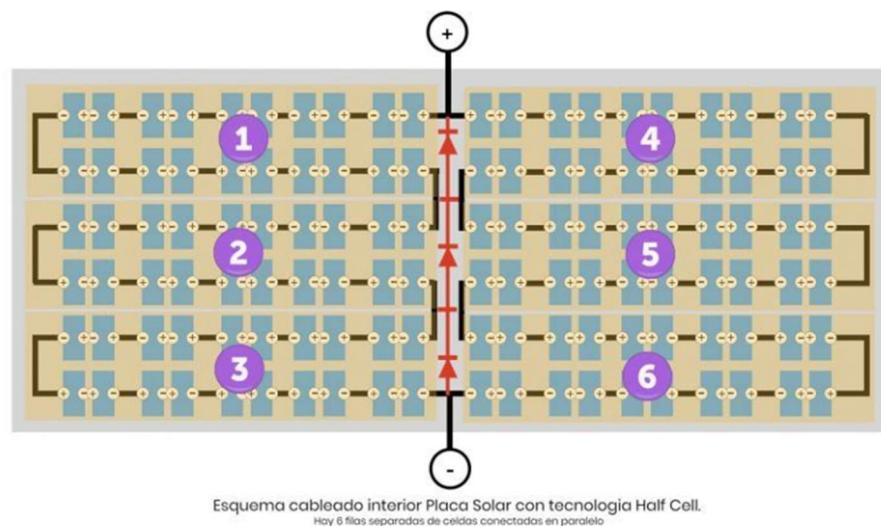


Figura 3.54. Módulo con tecnología Half-Cell

Además, el módulo seleccionado posee tecnología PERC (Passive Emitter Rear Contact) (Figura 3.55), que consiste en un tratamiento superficial de la parte trasera de la célula,

que se encarga de captar los fotones del ancho de onda que la atraviesa y que no es captada por ella para hacerla rebotar e introducirla de nuevo a la célula.

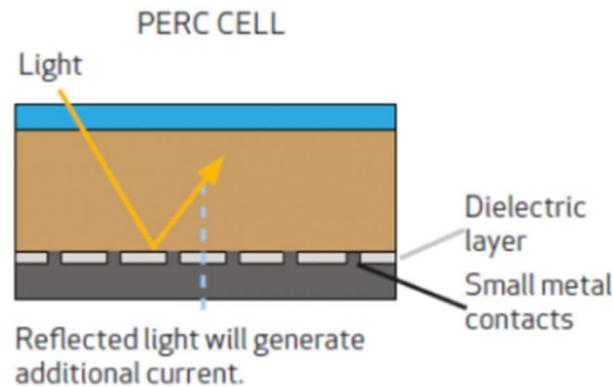


Figura 3.55. Tecnología PERC

La garantía del módulo fotovoltaico dada por el fabricante por defectos de fabricación es de 12 años y se garantiza una garantía de producción lineal durante los primeros 25 años, según la cual la regresión máxima en la producción del módulo será del 0,55% por año, lo que equivale a una disminución de la potencia del 13,75% a 25 años.

3.4.6 DISTRIBUCIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS MÓDULOS

Los criterios establecidos a la hora de distribuir y posicionar los módulos fotovoltaicos han sido los siguientes:

1. Conseguir la máxima eficiencia del módulo.

- Ángulo de inclinación óptimo (β): Es el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal (Figura 3.56). Su valor es 0° para módulos horizontales y 90° para módulos verticales. El valor de inclinación depende de la latitud del punto donde se prevé su instalación. En España, la inclinación idea suele encontrarse entre los 20° y 40° . Cuanto, más cerca al ecuador, el ángulo de inclinación de los módulos será menor.

La inclinación óptima, en los meses de verano serán los grados de la latitud de su ubicación menos 10° , y en los meses de invierno la latitud de su ubicación más 10° .

Debido a que no se cambiará la inclinación de la instalación a lo largo del año, como es normal, se obtiene la inclinación óptima a partir de la siguiente expresión:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 * \Phi \quad (3.20)$$

Ecuación 3.20. Inclinación óptima [36]

Siendo:

- Φ = latitud del emplazamiento

En nuestro caso, la inclinación óptima a la latitud donde nos encontramos (42°), para que la energía solar captada sea la máxima, se encuentra en torno a 30° .

- Ángulo de azimut u orientación óptimo (α): Ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar (Figura 3.56). Valores típicos son 0° para módulos orientados al sur, -90° para módulos orientados al este y $+90^\circ$ para módulos orientados al oeste. En España, la orientación óptima es la orientación Sur, ya que es donde la radiación del sol incide perpendicularmente sobre la superficie terrestre. Se buscará orientaciones hacia al sur (0°).

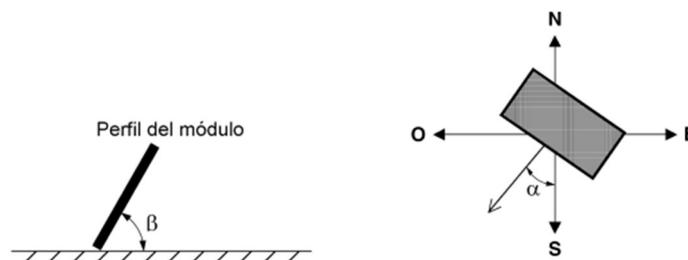


Figura 3.56. Inclinación (β) y orientación (α)

2. **Distancia entre filas:** se calcula por trigonometría la separación mínima entre filas de módulos, a partir de la altura solar más desfavorable en el año y la inclinación adoptada, con tal fin de que no se produzcan sombras entre ellas.

Atendiendo a estos criterios, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.52. Inclínación de los módulos

Latitud	42,30
Altura solar (°)	24,70
Inclínación óptima (°)	32,89
Orientación óptima	SUR
Posición del módulo	Vertical
Altura del módulo (m)	2,10
Inclínación adoptada (°)	30

Los módulos se colocarán sobre una estructura. Las características y cálculos estructurales no son objeto de este TFM.

A partir de una inclinación de módulo de 30°, la separación mínima entre filas que se obtiene para evitar sombras propias, en el mes más desfavorable del año, es de 4,09 m (Figura 3.57).

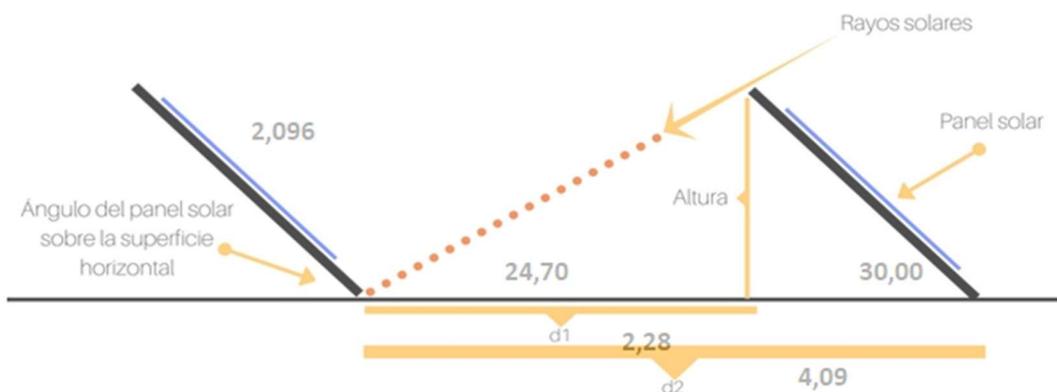


Figura 3.57. Disposición de módulos. Separación mínima entre filas. Fuente: elaboración propia.

Donde:

- d1: Distancia mínima desde el final del 1^{er} módulo (en su proyección horizontal) hasta el principio del 2^o módulo.
- d2: Distancia mínima desde el principio del 1^{er} módulo hasta el principio del 2^o módulo.

En esta fase, todavía no se ha decidido la conexión a realizar entre los módulos.

3.4.7 INVERSOR

El inversor es el encargado de transformar en corriente alterna (AC) la corriente continua (DC) generada por la planta fotovoltaica.

A la hora de seleccionar el inversor idóneo para la planta fotovoltaica diseñada, se debe tener en cuenta diferentes características, tales como:

Características de entrada al inversor: Corriente continua (DC)

- Factor de escala: Es la relación entre la potencia pico de la instalación y la potencia nominal del inversor. A la hora de elegir un factor de escala, se debe considerar las condiciones de la instalación (irradiancia, temperatura ambiente, inclinación adoptada frente a la óptima, orientación adoptada frente a la óptima...). Cuanto peores o más desfavorables sean estas condiciones, mayor deberá ser este factor de escala. Esto es debido a que la potencia pico de una instalación se obtiene a partir de la suma de la potencia pico unitaria de cada módulo, valor que nos indica la ficha del fabricante a unas condiciones muy concretas de laboratorio, las condiciones STC:
 - Irradiancia de 1000 W/m²
 - Temperatura de la célula fotovoltaica de 25°C.

Estas condiciones de laboratorios son muy favorables. En nuestra zona no llegaremos a una irradiancia de 1000 W/m² y la temperatura de la celda en diferentes momentos del año estará por encima de 25°C. Además, siempre hay una disminución de la potencia generada por los módulos debida a la suciedad acumulada a lo largo del tiempo, a las pérdidas en el cableado y en el inversor, además de la degradación de prestaciones del módulo por el inevitable envejecimiento.

Por lo tanto, la realidad nos indica que la potencia pico de la instalación, rara vez se alcanzará, por ello, se suele instalar mayor potencia pico que potencia nominal. El

factor de escala nos ayuda a realizar un prediseño a la hora de elegir la potencia del inversor.

No deberíamos aumentar en exceso el factor de escala eligiendo un inversor con una baja potencia, ya que pudiera provocar cortes de producción en ciertos momentos del día, lo que se llama efecto clipping.

Habitualmente se selecciona un factor de escala comprendido entre 1,1 y 1,3.

- Tensión máxima de entrada: Los valores suministrados por los fabricantes se refieren normalmente a unas condiciones estándar de laboratorio. Los módulos FV presentan una tensión en sus polos según la temperatura de trabajo; su tensión aumenta al disminuir la temperatura.

Esto implica que el control de la tensión máxima de circuito abierto se efectúa sobre la base de la mínima temperatura de trabajo y a dicha temperatura, la tensión deberá resultar inferior a la máxima aplicable en la entrada del inversor.

- Tensión de arranque: Para que el inversor arranque tiene que llegar a una tensión mínima. Por ello, se buscará un inversor que disponga de una tensión de arranque no muy elevada, y partiendo de que disponemos de una planta fotovoltaica pequeña, intentaremos reagrupar los módulos para obtener un valor de tensión que no sea más bajo que la tensión de arranque.
- Cantidad de MPPTs: Para la configuración de los módulos es importantes entender el concepto MPP (punto de máxima potencia). En la siguiente gráfica (Figura 3.59), se representa la curva intensidad-tensión-potencia de un módulo fotovoltaico:

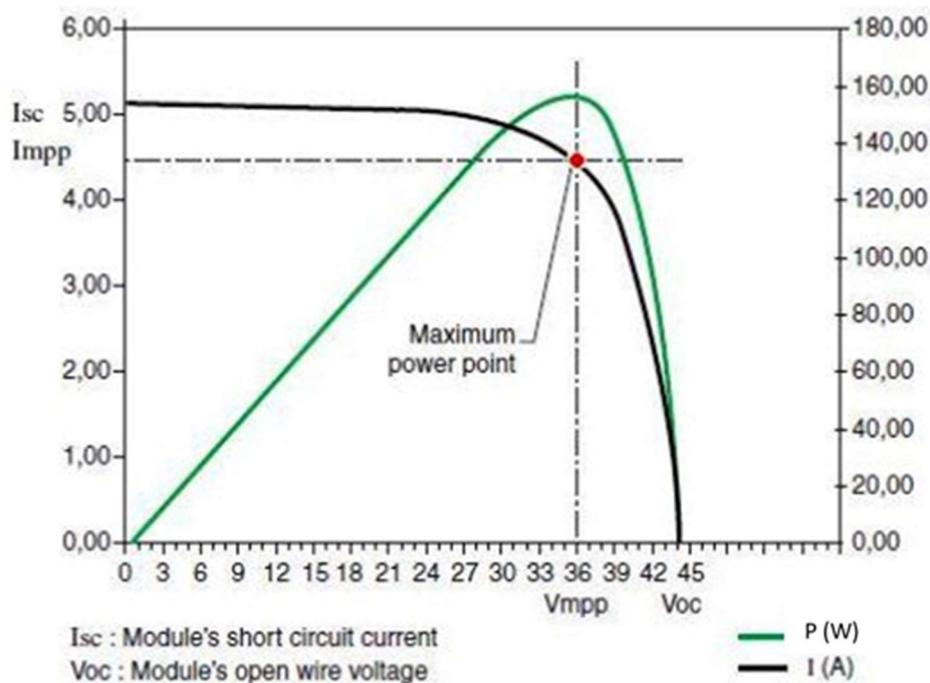


Figura 3.59. MPP. Curva Intensidad-tensión-potencia [37]

El MPP es el punto marcado con un círculo rojo en la gráfica. Éste es un punto de trabajo en el que la potencia entregada por el módulo a la carga externa es máxima.

Si se busca trabajar en el punto de máxima potencia, tendremos una tensión en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) y una intensidad en el punto de máxima potencia (I_{mpp}). El producto de V_{mpp} por I_{mpp} resulta la potencia en el punto de máxima potencia (P_{mpp}). Por lo tanto:

$$P_{mpp} = I_{mpp} * V_{mpp} \quad (3.21)$$

Ecuación 3.21. Punto de máxima potencia

Los seguidores del punto de máxima potencia (MPPT) es una de las características más importantes a la hora de obtener la máxima eficiencia de la instalación fotovoltaica. Es interesante dispone de varios MPPT en un inversor, cuando en la instalación se prevea tener módulos en diferentes condiciones, o que se prevé que habrá sombras por algún elemento o edificio cercano.

Si bien es cierto que, en nuestra instalación, todos los módulos se encuentran con la misma orientación e inclinación, y no se prevén sombras por elementos cercanos, siempre pueden aparecer sombras por trabajos de mantenimiento o deficiencias en algún módulo que no percibamos al instante.

- Rango de tensión de operación: es el rango de tensión en el cual el inversor es capaz de seguir el punto de máxima potencia. De cara a la obtención de un mayor rendimiento, es aconsejable configurar los strings para que operen en este rango de tensiones.
- Intensidad de entrada máxima por MPPT: Se refiere a la intensidad máxima en cada entrada de MPPT. Se debe tener especial atención a la hora de calcular los strings en paralelo que se prevén disponer.
- Entrada por cada MPPT: Se refiere a las bornes de entrada que disponga el inversor por cada MPPT. Se gestiona cada entrada al inversor individualmente, optimizando así, las diferentes configuraciones de la planta, dando como resultado un rendimiento óptimo. Otra de las ventajas es, que en caso de avería en alguna de las entradas del inversor, este es capaz de aislar dicho fallo y seguir funcionando con el resto de las entradas en funcionamiento, evitando la pérdida total de la producción. Es importante tener en cuenta este parámetro a la hora de configurar el número de strings que irán en paralelo en nuestra instalación fotovoltaica.

Características de salida del inversor: Corriente alterna (AC)

- Potencia nominal activa de CA: como se ha indicado anteriormente en la explicación del factor de escala, se determinará a partir de la potencia pico de la instalación y de las condiciones de la misma.
- Conexión a red eléctrica: Monofásica o trifásica. En nuestra instalación, la conexión a red será trifásica, cumpliendo con el Reglamento de Baja Tensión, según ITC-BT-40.
- Tensión nominal de salida: la tensión de la red eléctrica a la que se conectará nuestra instalación fotovoltaica.

- Máxima intensidad de salida: Parámetro a tener en cuenta de cara al cálculo de las protecciones en CA.

Otras características a tener en cuenta

- Dimensiones
- Rango de temperatura de operación
- Ventilación interior
- Comunicación
- Grado de protección

Teniendo en cuenta los parámetros citados se ha escogido un inversor trifásico de potencia nominal 17 kW del fabricante HUAWEI modelo SUN2000-17KTL-M0.



Figura 3.60. Inversor HUAWEI SUN2000-17KTL-M0

En la siguiente figura se puede apreciar el esquema de conexión básico del inversor seleccionado:

Diagrama de circuito

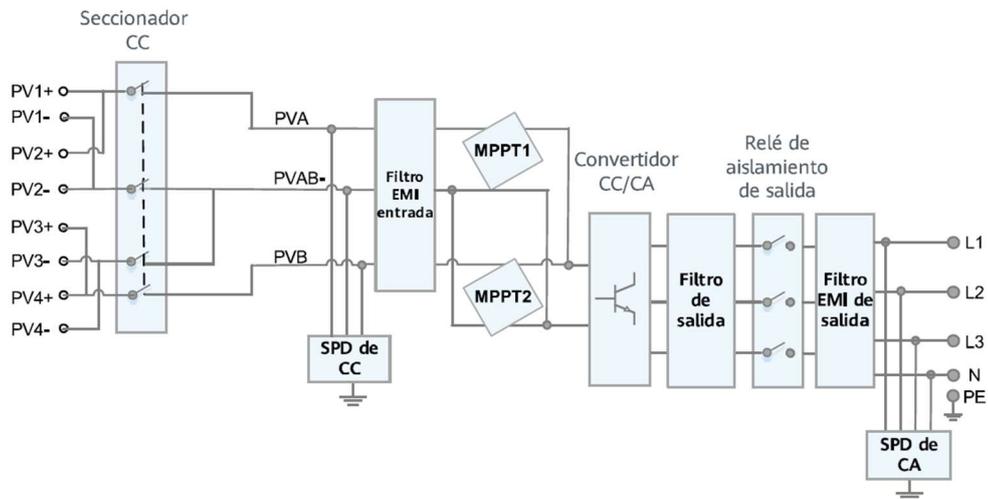


Figura 3.61. Diagrama de conexión del inversor [38].

Las características principales del inversor son las siguientes:

Tabla 3.53. Características del inversor

DESCRIPCIÓN	DATOS
MARCA	HUAWEI
MODELO	SUN2000-17KTL-M0
POTENCIA NOMINAL [kWac]	17
LADO CORRIENTE CONTINUA	
Voltaje máximo a la entrada (Vdc)	1.080 V
Voltaje mínimo de arranque (Vma)	200 V
Voltaje mínimo MPPT (Vmppt)	160 V
Voltaje máximo MPPT (VMppt)	950 V
Intensidad máxima admisible (Idc)	22 A
Número de MPPT independientes	2
Número de entradas	2
LADO CORRIENTE ALTERNA	
Voltaje de operación [Vac]	230/400 V
Frecuencia (f)	50 Hz
Tipo de red	Trifásica
Intensidad máxima de salida (Iac)	28,50 A
OTROS DATOS	
Ventilación	Convección natural
Eficiencia máx.	98,65 %
Dimensiones	525 x 470 x 262 mm
Índice de protección	IP65
Rango de temperatura de operación	-25 - +60 °C

En lo que se refiere al montaje y ubicación del inversor, se instalará en la sala técnica del túnel anexa a la planta fotovoltaica. En dicha sala se encuentran los cuadros eléctricos de baja tensión de alimentación del túnel, los armarios de electrónica y un SAI.

Se cumplirá con las separaciones y características del montaje establecidas por el fabricante.



Figura 3.62. Sala técnica de baja tensión del túnel de Erinyà

3.4.8 DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN

Una vez escogido el modelo de módulo y del inversor, se realizará el cálculo y dimensionamiento de la instalación.

3.4.8.1 PARÁMETROS EN CONDICIONES REALES

Se comienza obteniendo los valores técnicos reales de los módulos fotovoltaicos ya que, tal como se ha indicado anteriormente, los valores ofrecidos en las fichas técnicas están detallados bajo unas condiciones STC. Los nuevos valores obtenidos (intensidad y tensión) servirán para establecer la compatibilidad con el inversor seleccionado, y determinar la configuración y conexión entre módulos.

Por lo tanto, lo primero es determinar las condiciones climáticas de la zona próxima al túnel de Erinyà. Los valores se extraen de la herramienta de acceso gratuito desarrollada por la NASA, como ya se ha indicado anteriormente [35].

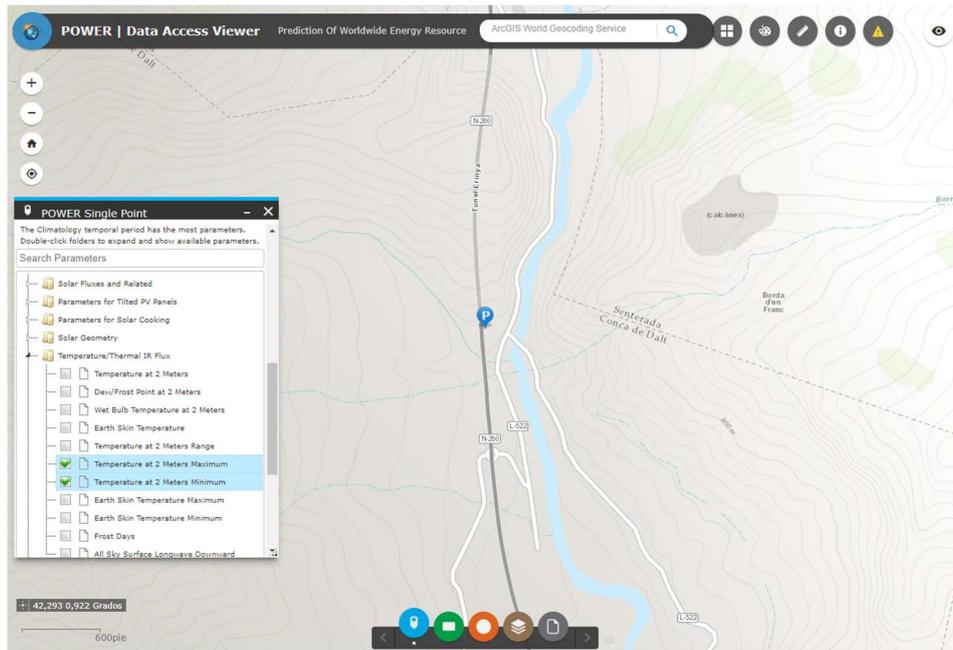


Figura 3.63. Visor de acceso a datos de climáticos de la NASA

Las temperaturas máximas y mínimas registradas en los últimos 15 años son:

- Temperatura máxima: 31,33 °C (correspondiente al mes de agosto).
- Temperatura mínima: -19,36 °C (correspondiente al mes de febrero).

El siguiente paso es obtener la irradiancia máxima y mínima en dicha zona. Estos valores se extraen de la herramienta PVGIS, en su última versión 5.2 [34].

Figura 3.64. PVGIS versión 5.2. Datos de irradiancia

Las irradiancias directa máxima y mínima (en horas de luz solar) registradas en los últimos 15 años son:

- Irradiancia máxima (G_{max}): $754,90 \text{ W/m}^2$ (correspondiente al mes de julio).
- Irradiancia mínima (G_{min}): $151,01 \text{ W/m}^2$ (correspondiente al mes de diciembre).

Se determina el rango de temperaturas a las que trabajarán las células fotoeléctricas de los módulos, a partir de las temperaturas e irradiancias obtenidas y de las condiciones de irradiancia aportadas en la ficha técnica del módulo. En todas las fichas técnicas de módulos, se aportan dos puntos de trabajo: STC y NOCT (800 W/m^2 de irradiancia y T^a ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Por lo tanto, con la siguiente expresión se obtiene la temperatura de trabajo de las células:

$$T_c = T_{amb} + G * \frac{NOCT - T_{amb}}{800} \quad (3.22)$$

Ecuación 3.22. Temperatura de la celda

Siendo:

- T_c = Temperatura de trabajo de la célula (°C)
- T_{amb} = Temperatura ambiente (°C)
- G = Irradiancia solar (W/m^2)
- NOCT = Temperatura operación nominal de la célula. En nuestro caso 45 °C

Aplicando la fórmula, resulta las siguientes temperaturas de la celda mínima y máxima:

- Temperatura celda máxima (T_{cM}): 54,92 °C
- Temperatura celda mínima (T_{cm}): -13,11 °C

Ambas temperaturas de trabajo se encuentran en el intervalo de temperatura de operación del módulo seleccionado: -40°C - +85°C.

A continuación, se calculan los diferentes parámetros eléctricos corregidos para las condiciones ambientales y de trabajo en la zona de la planta fotovoltaica, mediante las siguientes expresiones:

Tensión del circuito abierto a temperatura de celda mínima ($V_{ocM}(T_{cm})$)

La tensión de los módulos fotovoltaicos disminuye a medida que aumenta la temperatura de la celda, a tal punto que esta disminución implica una reducción importante de la potencia de salida del módulo al aumentar la temperatura. Paradójicamente se suele dar el caso, que en los períodos de mayor radiación disponible (meses de verano), también son los meses de mayores temperaturas ambiente, y por tanto la temperatura de la celda aumente por lo que, a nivel de módulos, la eficiencia de conversión de energía solar disminuya.

Se presenta en la siguiente gráfica (Figura 3.65) la influencia de la temperatura sobre la corriente y la tensión, manteniendo la irradiancia constante. Como se puede apreciar, la disminución de la temperatura hace aumentar la tensión de salida del módulo.

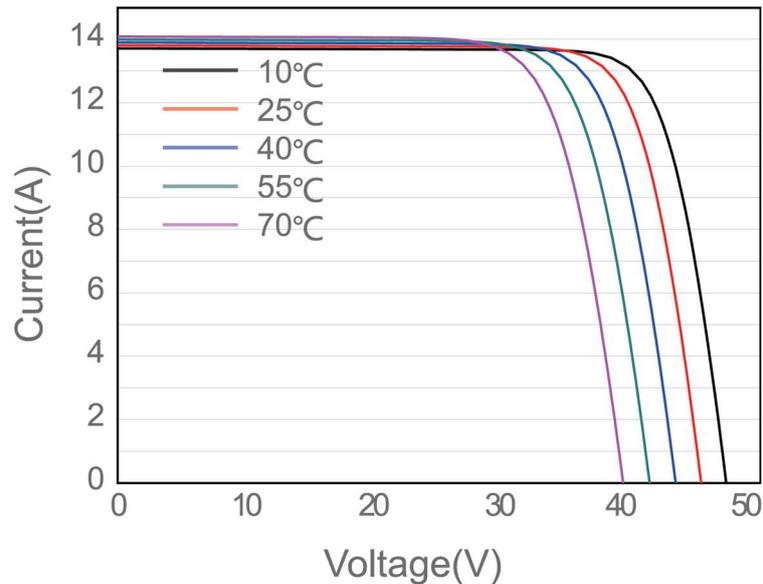


Figura 3.65. Curvas corriente-tensión del módulo en función de la temperatura [39]

De cara al dimensionamiento, se calcula cuando la temperatura de celda es mínima, siendo el punto de mayor tensión. El cálculo de este parámetro se puede aproximar con la siguiente expresión, donde se establece 0,23% como coeficiente de variación de tensión con la temperatura a circuito abierto:

$$V_{ocM}(T_{cm}) = V_{oc}^* - \frac{0,23}{100} * (T_{cm} - T_c^*) \quad (3.23)$$

Ecuación 3.23. Tensión del circuito abierto a temperatura de celda mínima

Siendo:

- $V_{ocM}(T_{cm})$ = Tensión del circuito abierto a temperatura de celda mínima real (V)
- V_{oc}^* = Tensión de circuito abierto en condiciones STC (V)
- T_{cm} = Temperatura de celda mínima (°C)
- T_c = Temperatura de celda en condiciones STC (°C).

Tensión en el punto de máxima potencia (V_{mpp})

$$V_{mpp} = V_{oc} * \frac{V_{mpp}^*}{V_{oc}^*} \quad (3.24)$$

Ecuación 3.24. Tensión en el punto de máxima potencia

Siendo:

- V_{mpp} = Tensión en el punto de máxima potencia real (V)
- V_{oc} = Tensión de circuito abierto a temperatura de celda máxima (V)
- V_{mpp}^* = Tensión en el punto de máxima potencia en condiciones STC (V)
- V_{oc}^* = Tensión en circuito abierto en condiciones STC (V)

Intensidad en cortocircuito (I_{sc})

$$I_{sc} = I_{sc}^* * \frac{G_{max}}{G_{STC}} \quad (3.25)$$

Ecuación 3.25. Intensidad de cortocircuito

Siendo:

- I_{sc} = Intensidad de corto circuito real (A)
- I_{sc}^* = Intensidad de cortocircuito en condiciones STC (A)
- G_{max} = Irradiancia máxima obtenida en PVGIS (W/m^2)
- G_{stc} = Irradiancia en condiciones STC ($1000 W/m^2$)

En la siguiente tabla, se presentan los datos de entrada y los resultados obtenidos:

Tabla 3.54. Resultados: parámetros condiciones reales del módulo

DATOS CLIMÁTICOS	
Temperatura ambiente máxima (TaM)	31,33 °C
Temperatura ambiente mínima (Tam)	-19,36 °C
Irradiancia máxima (Gmax)	754,90 W/m ²
Irradiancia mínima (Gmin)	151,01 W/m ²

PARÁMETROS DEL MÓDULO	
CONDICIONES STC	
Potencia Pico (Wp)	505 W
Voltaje Circuito Abierto (Voc*)	45,72 V
Temperatura celda (Tc*)	25,00 °C
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmpp*)	38,53 V
Intensidad de cortocircuito (Isc*)	14,00 A
CONDICIONES NOCT	
Nominal Operation Cell Temperature (NOCT)	45,00 °C
CONDICIONES REALES	
Temperatura mínima celda (Tcm)	-14,64 °C
Voltaje Circuito Abierto a Tcm (VocM (Tcm))	45,81 V
Temperatura Celda a máxima potencia (Tmpp)	54,92 °C
Voltaje Circuito Abierto a Tmpp (Voc (Tmpp))	45,65 V
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmpp)	38,47 V
Intensidad de Corto circuito real (Isc)	10,57 A

3.4.8.2 NÚMERO DE MÓDULOS EN SERIE

Se procede al dimensionamiento y configuración de la instalación. Para determinar el número de módulos en serie por string, se parte de las siguientes 3 condiciones:

CONDICIÓN 1: $V_{string} < V_{dc}$ (inversor)

Se utilizan las condiciones más críticas a disponer en el módulo, calculadas para la tensión de circuito abierto a temperatura mínima, $(V_{ocM} (T_{cm}))$, donde la tensión será la máxima en el módulo. A partir del inversor seleccionado (Tabla 3.53), se calcula el número máximo de módulos a colocar, con la siguiente expresión:

$$N^{\circ}_{m\acute{a}x.m\acute{o}d. \text{ por string}} = \frac{V_{dc} (\text{inversor})}{V_{ocM}} \quad (3.26)$$

Ecuación 3.26. N° máximo de módulos por string

Siendo:

- Vdc= Voltaje máximo a la entrada del inversor (V)
- VocM= Tensión del circuito abierto a temperatura de celda mínima real (V)

De cara a una configuración óptima, se calcula el número de módulos a colocar por cada string, para aprovechar el rango de seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) del inversor. Si la tensión de operación disminuye por debajo del límite mínimo o supera el límite máximo del rango, implica una reducción del rendimiento global de la instalación, ya que simplemente el algoritmo del inversor no localizaría el punto de máxima potencia dentro de su rango. Por lo tanto, se calcula el número mínimo y máximo de módulos a colocar, con la siguiente expresión:

CONDICIÓN 2: $V_{string} < V_{Mppt}$

$$N^{\circ}_{\text{máx.mód. por string}} = \frac{V_{Mppt}(\text{inversor})}{V_{mpp}} \quad (3.27)$$

Ecuación 3.27. N° máximo de módulos por string -rango de seguimiento del MPP

Siendo:

- V_{Mppt} = Tensión superior del rango de seguimiento del MPP del inversor (V)
- V_{mpp} = Tensión del módulo en el punto de máxima potencia en condiciones reales (V)

CONDICIÓN 3: $V_{string} > V_{mppt}$

$$N^{\circ}_{\text{mín.mód. por string}} = \frac{V_{mppt}(\text{inversor})}{V_{mpp}} \quad (3.28)$$

Ecuación 3.28. N° mínimo de módulos por string -rango de seguimiento del MPP

Siendo:

- V_{mppt} = Tensión inferior del rango de seguimiento del MPP del inversor (V)

- V_{mpp} = Tensión del módulo en el punto de máxima potencia en condiciones reales (V)

En la Tabla 3.55 se presentan los parámetros del inversor utilizado para el cálculo y los resultados obtenidos:

Tabla 3.55. Nº mínimo y máximo de módulos por string

PARÁMETROS DEL INVERSOR			
Potencia Nominal (kWn)			17 kW
Voltaje máximo en la entrada (Vdc)			1.080 V
Voltaje superior MPP tracker (VMppt)			950 V
Voltaje Inferior MPP tracker (Vmppt)			160 V
Intensidad máxima adminisble (Idc)			22 A
RESULTADOS			
Condición 1	$V_{string} < V_{dc}$	Módulos en serie	23
Condición 2	$V_{string} < V_{Mppt}$	Módulos en serie	25
Condición 3	$V_{string} > V_{mppt}$	Módulos en serie	4
String en paralelo		Ramas en paralelo	2
4		\leq Nº módulos en serie \leq	23

3.4.8.3 NÚMERO DE MÓDULOS EN PARALELO

Una vez que se ha calculado el umbral de módulos a colocar en serie, se debe calcular el número de ramales (strings) a disponer en la instalación fotovoltaica. En este caso, el límite lo establece la corriente máxima de entrada al inversor. El número máximo de strings a disponer vendrá expresado por:

$$N^{\circ}_{m\acute{a}x.strings} = \frac{I_{dc} (inversor)}{I_{sc} (m\acute{o}dulo)} \tag{3.29}$$

Ecuación 3.29. Nº máximo de strings a disponer

Siendo:

- I_{dc} (inversor)= Intensidad máxima admisible a la entrada del inversor: 22 A en este caso.
- I_{sc} (módulo)= Intensidad de corto circuito real en el módulo: 10,57 A.

El número máximo de strings es: 2

Por tanto, en base al número máximo (23) y mínimo (4) de módulos conectados en serie, al número máximo de strings (2), y el número de módulos que se pueden instalar en la superficie disponible, la configuración propuesta es la siguiente: 2 strings, formado uno de ellos por las 3 filas existentes de 6 módulos (18 módulos) y el otro string, formado con los 17 módulos restantes.

A continuación, se muestra en la Tabla 3.56 la configuración de los módulos y parámetros eléctrico en la entrada del inversor utilizado, y en la Figura 3.66 el esquema unifilar de la instalación:

Tabla 3.56. Configuración planta fotovoltaica

PARTE DE ENTRADA AL INVERSOR (DC)									
MÓDULO FOTOVOLTAICO / INVERSOR		Inclinación módulos [°]	Azimet módulos [°]	Número de módulos	Potencia [Wp]	Isc [A]	Voc [V]	Vmpp [V]	Vdc inversor [V]
MÓDULO 505 Wp					505	10,57	45,81	38,47	-
INVERSOR 1	ENTRADA A	30°	0° (sur)	17	8.585	22	779	654	1.080
	ENTRADA B	30°	0° (sur)	18	9.090	22	825	692	1.080
TOTAL				35	17.675				

- Potencia pico total: 17,675 kWp
- Potencia nominal: 17 kWn

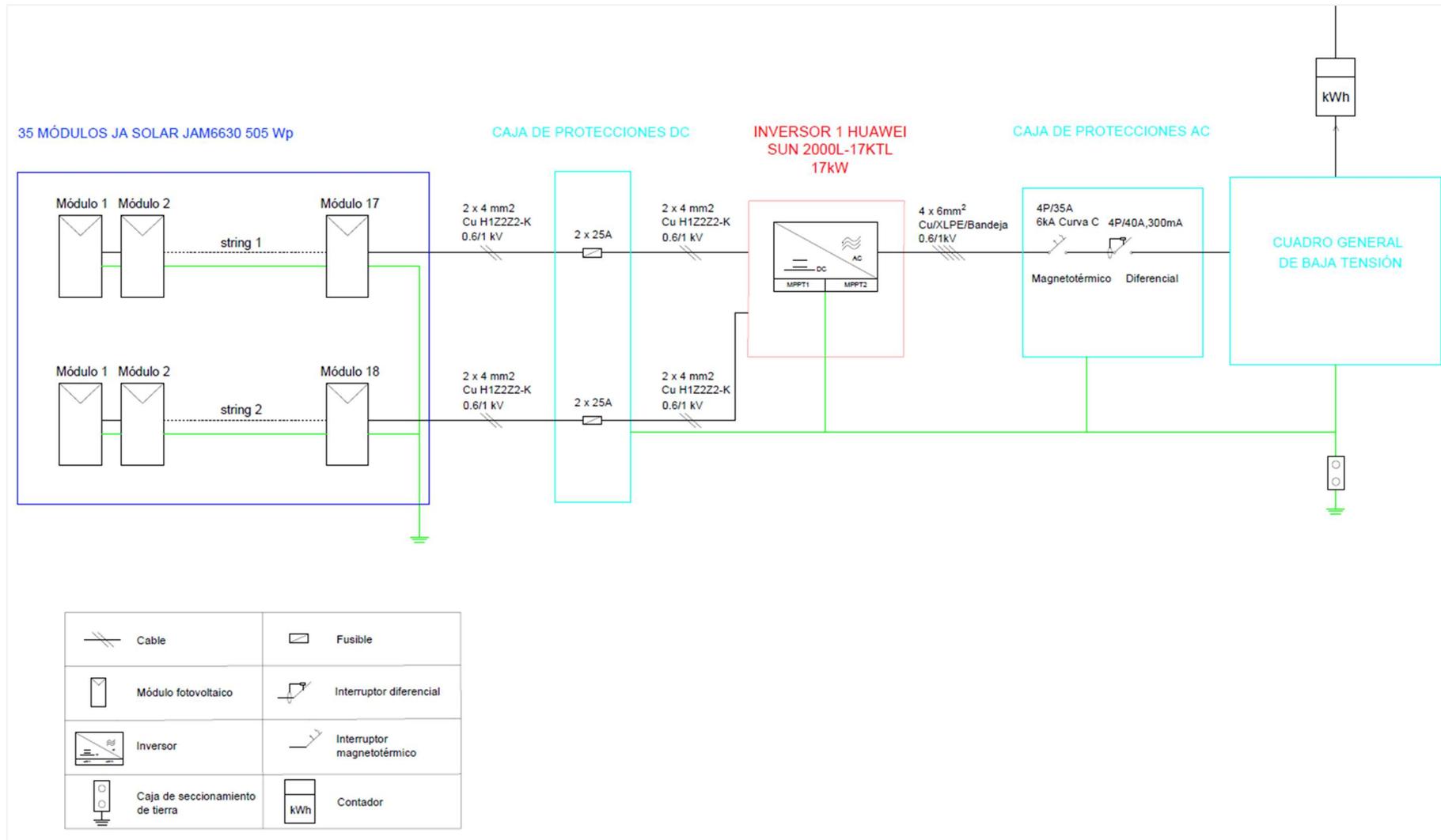


Figura 3.66. Esquema unifilar de la instalación FV

3.4.8.4 RÉGIMEN DE OPERACIÓN

Para conocer y verificar el correcto funcionamiento de la instalación analizamos el régimen de operación del inversor seleccionado, teniendo en cuenta los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos y la configuración propuesta.

A continuación, se muestra en la Tabla 3.57 los parámetros de operación del inversor utilizado, en función de la irradiancia y la configuración de los módulos propuesta:

Tabla 3.57. Régimen de operación del inversor

INVERSOR 1: HUAWEI - SUN2000-17KTL-M0							
MPP	Entrada	String	Suma parcial	V _{mpp} [V]	I _{mpp} [A]	I _{sc} [A]	P _{máx.} [W]
MPPT 1	1	1	17	654	9,90	10,57	6.472,71
MPPT 2	1	1	18	692	9,90	10,57	6.853,45
TOTAL	2	2	35				13.326,16

Como se puede apreciar en la Tabla 3.57, la potencia máxima a generar por la instalación fotovoltaica se encuentra en 13,33 kW en las condiciones climáticas establecidas según el registro histórico. La discrepancia entre este valor y la potencia pico de la instalación indicada: 17,67 kWp, es debido a que el valor establecido para los cálculos de irradiancia máxima es de 754,90 W/m² y la irradiancia en las condiciones estándar (STC) de laboratorio del módulo fotovoltaico son de 1000 W/m².

En la siguiente gráfica extraída de la ficha técnica del modelo del módulo, se puede apreciar la relación entre la potencia generada por el módulo en función de la irradiancia. La gráfica que se aporta a modo de ejemplo, es de un módulo de potencia pico de 495Wp.

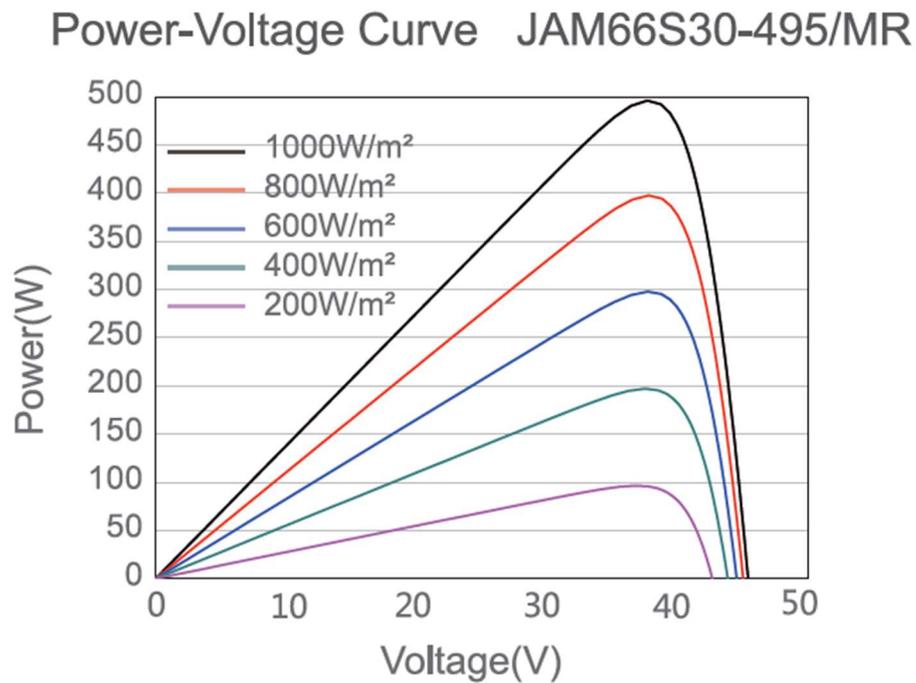


Figura 3.67. Curva potencia pico-voltaje en función de la irradiancia [39]

Se presenta, una vez verificado y comprobado teóricamente la operatividad de la configuración, en la siguiente figura la conexión y distribución de los 35 módulos y 2 strings (colores amarillo y naranja) que forman la planta fotovoltaica:

La nomenclatura para identificar al módulo y string a conectar en el inversor es la siguiente (X.Y.):

- 1^{er} número (X.): número de MPPT, en este caso también string, al haber solo un string por cada MPPT.
- 2^o número (Y.): número de módulo en cada string.

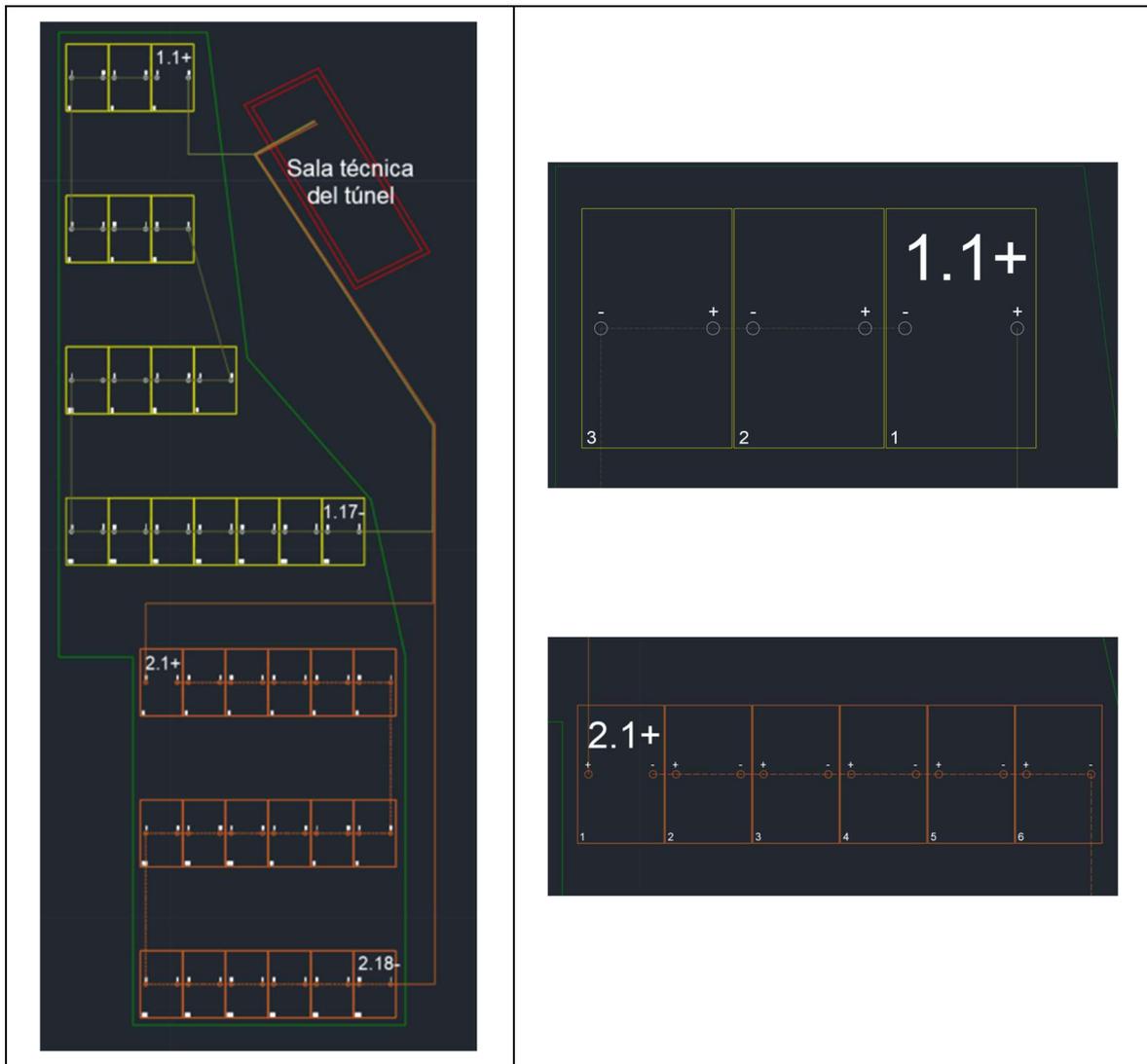


Figura 3.68. Configuración de la instalación FV

3.4.8.5 RED DE DISTRIBUCIÓN

La red de distribución comprende a todos los conductores que transportan la energía eléctrica desde los módulos fotovoltaicos hasta el punto de conexión situado en el armario de baja tensión general de la sala técnica del túnel de Erinyà.

La red de distribución estará formada por dos partes diferenciadas, la parte de corriente continua y la parte de corriente alterna. En ambas partes, todos los elementos utilizados se diseñan bajo la normativa vigente.

El cable de corriente continua se trasladará bajo tubo enterrado y el cable de corriente alterna se instalará sobre bandeja en el interior de la sala técnica.

Se tendrá en cuenta las siguientes recomendaciones, en cuanto a la señalización del cableado, de la Agencia de energía de Barcelona:

- Identificación del cableado de CC y CA
- En el caso de CC hay que identificar especialmente con señalización de peligro aquellos que permanecen en tensión a pesar de desconectar la caja de protecciones. Habrá que identificar la tensión máxima.
- Indicar las identificaciones en bandejas o tubo.
- En el caso de los cableados de CC procedentes de los módulos de FV y previo entrar en la caja de protección de CC o en el inversor habrá que identificar string.
- En el caso del cableado de CA se identificará cada una de las fases.

3.4.8.6 DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

Siguiendo el REBT, para el cálculo de la sección y características de los conductores se han tenido en cuenta los siguientes 3 criterios:

1. Temperatura máxima admisible
2. Máxima caída de tensión
3. Máxima corriente admisible.

Temperatura máxima admisible

La ITC-BT-07 del REBT indica que, las intensidades máximas admisibles en servicio permanente dependen en cada caso de la temperatura máxima que el aislamiento pueda soportar sin alteraciones de sus propiedades eléctricas, mecánicas o químicas. Esta temperatura es función del tipo de aislamiento y del régimen de carga. Se aporta, con carácter informativo, las temperaturas máximas admisibles para algunos tipos de cables aislados con aislamiento seco. Usualmente, en cable aislado, se utiliza como aislamiento: polietileno reticulado (XLPE) o etileno propileno (ERP) que soportan temperatura en servicio permanente de 90°C. En el caso de instalaciones fotovoltaicas, suelen colocarse cables específicos, con mejores prestaciones. El aislamiento seleccionado será tipo Z

(Elástomero termoestable libre de halógenos). Soporta temperatura de 90 °C y durante 20.000 horas hasta 120 °C en la parte de corriente continua.

Intensidad máxima admisible

La ITC-BT-40 del REBT indica que, los cables de conexión deberán estar dimensionados para una intensidad no inferior al 125% de la máxima intensidad del generador y la caída de tensión entre el generador y el punto de interconexión a la Red de Distribución Pública o a la instalación interior, no será superior al 1,5%, para la intensidad nominal.

En nuestro caso, para corriente continua es:

- Intensidad de corto circuito del módulo: 14 A
- Intensidad máxima admisible: $1,25 * 14 = 17$ A

Consultando los requisitos establecidos por el REBT en la ITC-BT-07, en su tabla 5, para *cables con conductores de cobre en instalación enterrada, unipolares*, se puede apreciar que, para la sección menor incluida de 6mm² y cualquiera de los aislamientos contemplados, la intensidad admisible está muy por encima de 17 A.

Máxima caída de tensión

La caída de tensión máxima que se admite en las líneas de corriente continua es del 1,5% y del 2% para líneas de corriente alterna.

Para corriente continua se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$S = \frac{2 * L * I_{SC}}{c * dt * \gamma} \quad (3.30)$$

Ecuación 3.30. Sección en cable de corriente continua

Siendo:

- S: Sección de conductor (mm²)
- L=Longitud de la línea (m)

- I_{SC} = Intensidad de cortocircuito del módulo (A)
- cdt = caída de tensión admisible (1,5%)
- γ = conductividad ($m/(\Omega \cdot mm^2)$)

A continuación, se presenta los resultados obtenidos del dimensionamiento del cableado para el criterio de caída de tensión para el cableado de corriente continua (Tabla 3.58):

Tabla 3.58. Cálculo cableado corriente continua (DC)

Conductor cable	Cobre
Conductividad del conductor para T^a 90°C (γ) [S*m/mm]	44
Caída de tensión máxima (cdt) permitida [%]	1,50%

Corriente continua (DC)												
Entrada MPP INVERSOR	STRING	Polaridad	Potencia módulo STC [Wp]	Voc módulo [V]	Nº de módulos	Tensión string [V]	Longitud del cable [m]	cosΦ	Intensidad máx. [A]	Sección de cable [mm ²]	Sección normalizada [mm ²]	Caída de tensión string [%]
MPPT 1	1	+	505	46	17	777,24	10	1	14,00	0,546	4	0,20%
		-	505	46	17	777,24	20	1	14,00	1,092	4	0,41%
MPPT 2	2	+	505	46	18	822,96	30	1	14,00	1,547	4	0,58%
		-	505	46	18	822,96	35	1	14,00	1,804	4	0,68%

Se considera que la temperatura del terreno es 25°C, y la resistividad térmica del terreno es igual a 1 K.m/W.

Respecto a la línea de corriente alterna, se realizan las mismas comprobaciones indicadas anteriormente.

En este caso la línea no será enterrada, se instalará en bandeja no perforada en el interior de la sala técnica del túnel. Para la elección del cableado se seguirá lo indicado en las IT-BT-07, ITC-BT-40 e ITC-BT-19 para instalaciones interiores, del REBT.

Temperatura máxima admisible

Se exige lo mismo que se han indicado anteriormente en corriente continua. Se deberá disponer de un aislamiento que soporte temperaturas de 90° como mínimo. Se colocarán cables resistentes a temperatura extremas, de alta seguridad (AS), no propagadores de llama, ni fuego, y de baja emisiones de humos y gases tóxicos.

- Cable AC tipo RZ-1 0,6/1kV XLPE CU.

Intensidad máxima admisible

La intensidad máxima a la salida del inversor es igual a 28,50 A.

Siguiendo la ITC-BT-40, los cables de conexión deberán estar dimensionados para una intensidad no inferior al 125% de la máxima intensidad. Por lo tanto:

- Intensidad máxima admisible: $1,25 * 28,50 = 35,63 \text{ A}$

El cableado se instalará en bandeja no perforada, por lo que consultando los requisitos establecidos por el REBT en la ITC-BT-19, en su tabla 5, se corresponde al tipo de instalación C, 3 x XLPE. En base a estas características, puede apreciar que, para una sección de cable de 6 mm², la intensidad admisible es 49 A, siendo superior a la intensidad máxima admisible (35,63 A).

C		Cables multiconductores directamente sobre la pared ⁹⁾					3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
----------	---	---	--	--	--	--	-----------	-----------	--	------------------------	------------------------	--	--

Máxima caída de tensión

Para corriente alterna se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} * L * I_{max} * \cos}{c * d * t * \gamma} \quad (3.31)$$

Ecuación 3.31. Sección en cable de corriente continua

Siendo:

- S: Sección de conductor (mm²)
- L=Longitud de la línea (m)
- I_{max}= Intensidad máxima a la salida del inversor (A)
- cdt= caída de tensión admisible (1,5%)
- γ= Conductividad del material (cobre), en m/(Ω·mm²)= 56.

Tabla 3.59. Cálculo cableado corriente alterna (AC)

Conductor cable	Cobre
Conductividad del conductor a T ^a :40°C [S*m/mm]	56
Caída de tensión máxima permitida [%]	2,00%

Corriente alterna (AC)								
Tramo	Potencia instalada [KW]	Tensión [V]	cosΦ	Longitud del cable [m]	Intensidad máxima [A]	Sección de cable [mm ²]	Sección normalizada [mm ²]	Caída de tensión string [%]
INVERSOR AL C.G. DE BT	17	400	1	8	28,5	0,881	2,5	0,71%

Por tanto, adoptando el criterio más restrictivo, que en este caso es la intensidad máxima admisible, se selecciona un cable para el tramo de corriente alterna con una sección de 6 mm².

3.4.8.7 PROTECCIONES DC Y AC

La instalación dispondrá de las protecciones necesarias para el correcto funcionamiento de la instalación y para evitar situaciones peligrosas, tanto en el lado de corriente continua como en el lado de corriente alterna.

Corriente continua

La instalación fotovoltaica dispondrá de elementos de protección en corriente continua situados antes del inversor. Como se ha indicado anteriormente, las líneas de corriente continuas serán conducidas desde los módulos fotovoltaicos hasta una caja de protecciones de corriente continua situada en la sala técnica, antes de la entrada al inversor.

En este caso, para una intensidad máxima (I_{sc}) para cada string de 14 A, se dispondrán de fusibles de 25 A (tipo gPV según la norma IEC 60269-6), para voltaje de 1000 VDC, proporcionando protección contra sobrecargas y cortocircuitos.

Por otra parte, los inversores incorporan en su interior, tal y como establece la normativa vigente, una separación galvánica entre los circuitos de corriente continua y alterna, para evitar la inyección de corriente continuo en la red y la transferencia de faltas del circuito de DC al de AC.

Corriente alterna

Se instalarán protecciones magnetotérmicas contra sobretensiones y cortocircuitos, así como protecciones diferenciales contra defectos de aislamiento.

Éstas irán instaladas en un armario de protecciones situado junto al inversor.

La intensidad máxima de salida del inversor es de 28,5 A y la intensidad máxima admisible del cable seleccionado (6 mm²) es de 44 A.

Se colocará un magnetotérmico tetrapolar de 35 A, curva C, de 6000 A de poder de corte y un diferencial trespolar, de 40 A, calibrado a una sensibilidad de 300 mA, de clase A.

3.4.8.8 ESTUDIO ENERGÉTICO

En primer lugar, para la estimación de la producción mensual, se deben calcular las pérdidas asociadas a la instalación fotovoltaica, a que a continuación se detallan:

1. Pérdidas por temperatura

Las características de los módulos vienen dadas por unas condiciones estándar (STC), que son una temperatura de célula de 25°C, una distribución espectral de 1,5 A.M. y radiación de 1000 W/m².

En los cálculos realizados durante el dimensionamiento, se ha calculado el voltaje e intensidad teniendo en cuenta las condiciones climáticas reales en la zona donde se prevé colocar la instalación fotovoltaica.

Según las características del fabricante, hay una variación en potencia en función de la temperatura de -0,35%/°C. Como media anual, se estima unas pérdidas del 8,00% [40]

2. Pérdidas por suciedad y polvo

Estas pérdidas son difíciles de computar, ya que depende del mantenimiento preventivo que se realice a la instalación. Las pérdidas por polvo en un día determinado pueden ser del 0% al día siguiente de un día de lluvia y llegar al 8% cuando los módulos se "ven muy sucios". Estas pérdidas dependen de la inclinación de los módulos, cercanías a carreteras, etc.

En esta instalación en concreto, se incorporará tareas de limpieza de los módulos dentro del plan de mantenimiento del túnel, por lo que, aun estando cerca de la carretera, se establece un 2% de pérdidas por suciedad y polvo.

3. Pérdidas por orientación e inclinación

Las pérdidas por orientación e inclinación se calculan con la siguiente expresión para ángulos de inclinación mayores a 15°, como es nuestro caso:

$$Poi = 100 * (0,00012 * (\beta - \Phi + 10)^2 + 0.000035 * \alpha^2) \quad (3.32)$$

Ecuación 3.32. Pérdidas por orientación e inclinación

Siendo:

- B= ángulo de azimut (orientación)
- α = ángulo de inclinación
- Φ = latitud

Resulta unas pérdidas por orientación e inclinación de: 0,10%

4. Pérdidas por sombras externas

La radiación solar sobre los módulos cambiará si hay elementos cercanos en el horizonte, que bloquean la radiación del sol durante algunos periodos del día. En nuestra instalación solar no se prevé la aparición de sombras por elementos ajenos.

5. Pérdidas por sombras propias

En momentos del día en los cuales la elevación solar es baja, se pueden producir sombra entre filas de módulos. Estas sombras causan una reducción en la radiación percibida por los módulos sombreados. En nuestra instalación, para evitar pérdidas por sombras propias, se ha dimensionado la instalación separando las filas 4,09 m, partiendo del mes más desfavorable del año, en cuanto a altura solar, por lo que no se prevén pérdidas por sombras propias.

6. Pérdidas por Mismatch

Las pérdidas por Mismatch se asocian a que las células y/o módulos que forman la instalación no son idénticas, y sus parámetros eléctricos varían. Además, un dimensionamiento del cableado heterogéneo puede conducir a diferentes caídas de tensión y pérdidas de desajuste adicionales. En nuestra instalación en concreto, se ha considerado un único modelo de módulo y se ha establecido una única sección de cableado. Si bien es cierto que, dentro de un mismo modelo de módulo, se presentan

alteraciones de comportamiento eléctrico, se consideran pérdidas mínimas. Se establece un 1% de pérdidas por Mismatch.

7. Pérdidas por reflectancia angular y espectral

Las pérdidas por reflectancia angular y espectral pueden despreciarse cuando se mide el campo FV al mediodía solar (± 2 h) y también cuando se mide la radiación solar con una célula calibrada de tecnología equivalente (CTE) en el módulo FV. Estas pérdidas pueden oscilar entre el 0% y 6%, siendo mayores en localizaciones de mayor altitud, y en invierno que en verano. En este caso, se desprecian.

8. Rendimiento del inversor (pérdidas de conversión).

En nuestro caso, el rendimiento del inversor seleccionado es del 98,65%, por lo que las pérdidas de conversión son 1,35%.

9. Pérdidas por cableado

Normalmente, las pérdidas en conmutadores, fusibles y diodos son muy pequeñas y no es necesario considerarlas. Las caídas en el cableado pueden ser muy importantes cuando son largos y se opera a baja tensión en CC. Las pérdidas por cableado en tanto por ciento suelen ser inferiores en plantas de gran potencia que en plantas de pequeña potencia. En nuestro caso, se establece 1,5% [40].

Con el fin de determinar la eficiencia global de la Instalación (Performance Ratio, PR) y poder estimar la energía producida por la instalación se presenta a continuación a modo resumen, las pérdidas explicadas anteriormente y el PR resultante:

Tabla 3.60. Performance Ratio (PR)

Concepto	Pérdidas	
Pérdidas por temperatura	8,00%	92,00%
Pérdidas por suciedad y polvo	2,00%	98,00%
Pérdidas por orientación e inclinación	0,10%	99,90%
Pérdidas por sombras externas	0,00%	100,00%

Concepto	Pérdidas	
Pérdidas por sombras propias	0,00%	100,00%
Pérdidas por Mismatch	1,00%	99,00%
Pérdidas por reflectancia angular y espectral	0,00%	100,00%
Pérdidas en el inversor	1,35%	98,65%
Pérdidas por cableado	1,50%	98,50%
Performance Ratio (PR)	86,65%	

A continuación, se realiza la estimación de producción mensual realizada a partir los datos obtenidos del PVGIS, y del dimensionamiento de nuestra instalación fotovoltaica.

En el 3.4.3, se incluyó la radiación solar sobre superficie horizontal. Una vez conocida la inclinación en la que se dispondrán los módulos, se calcula el valor de radiación solar para la inclinación de los módulos establecida (30°). Debido a que en la base de datos de la NASA no se aporta la radiación solar para un ángulo de inclinación, hay dos opciones:

1. **Obtención a través del factor de corrección para superficies inclinadas.** El factor k representa el cociente entre la energía incidente en un día sobre una superficie orientada hacia el Ecuador e inclinada un determinado ángulo, y otra horizontal. En la Tabla 3.61, se presenta el factor k para una latitud de 42°:

Tabla 3.61. Factor k. Fuente: www.cleanergysolar.com

Latitud = 42°

Inc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1.08	1.06	1.05	1.03	1.02	1.02	1.02	1.04	1.06	1.08	1.09	1.09
10	1.15	1.12	1.09	1.06	1.04	1.03	1.04	1.06	1.11	1.15	1.18	1.17
15	1.21	1.17	1.13	1.08	1.04	1.03	1.04	1.09	1.15	1.22	1.26	1.25
20	1.27	1.21	1.15	1.09	1.04	1.03	1.05	1.1	1.18	1.28	1.34	1.32
25	1.32	1.25	1.17	1.09	1.04	1.01	1.04	1.1	1.21	1.33	1.4	1.38
30	1.36	1.28	1.19	1.09	1.02	1	1.02	1.1	1.23	1.37	1.46	1.44
35	1.39	1.3	1.19	1.08	1	.97	1	1.09	1.23	1.4	1.51	1.48
40	1.42	1.31	1.19	1.06	.97	.94	.97	1.08	1.24	1.42	1.54	1.52
45	1.43	1.32	1.18	1.04	.94	.9	.94	1.05	1.23	1.43	1.57	1.54
50	1.44	1.31	1.16	1	.89	.86	.9	1.02	1.21	1.44	1.59	1.56
55	1.44	1.3	1.13	.97	.85	.8	.85	.98	1.19	1.43	1.59	1.57
60	1.43	1.28	1.1	.92	.79	.75	.8	.93	1.15	1.41	1.59	1.57
65	1.41	1.25	1.06	.87	.74	.69	.74	.88	1.11	1.39	1.57	1.55
70	1.38	1.21	1.01	.81	.67	.62	.67	.82	1.07	1.35	1.55	1.53
75	1.35	1.17	.96	.75	.6	.55	.6	.76	1.01	1.31	1.52	1.5
80	1.3	1.12	.9	.68	.53	.48	.53	.69	.95	1.25	1.47	1.46
85	1.25	1.06	.83	.61	.46	.4	.46	.62	.88	1.19	1.42	1.41
90	1.19	1	.76	.54	.38	.32	.38	.54	.81	1.12	1.36	1.35

En la Tabla 3.62, se presenta la radiación solar resultante:

Tabla 3.62. Radiación solar plano inclinado (30°) diaria. Fuente: elaboración propia.

MES	factor k	Radiación plano horizontal (G(0)) [kWh/m2]	Radiación plano inclinado (G (30)) [kWh/m2]
ENERO	1,36	2,00	2,72
FEBRERO	1,28	2,84	3,64
MARZO	1,19	4,01	4,77
ABRIL	1,09	4,93	5,37
MAYO	1,02	5,79	5,91
JUNIO	1,00	6,67	6,67
JULIO	1,02	6,79	6,93
AGOSTO	1,10	6,00	6,60
SEPTIEMBRE	1,23	4,66	5,73
OCTUBRE	1,37	3,14	4,30
NOVIEMBRE	1,46	2,17	3,17
DICIEMBRE	1,44	1,70	2,45
TOTAL (kWh/m2/año)		1.542,13	1.771,84
% Aumento de radiación entre plano inclinado y horizontal			14,90%

2. Obtención de la radiación para un plano inclinado directamente del PVGIS.

En la siguiente gráfica se puede observar la radiación mensual global, directa, y radiación en el ángulo de inclinación establecido en nuestra instalación (30°), durante el año 2020 (último año que dispone de registro PVGIS):

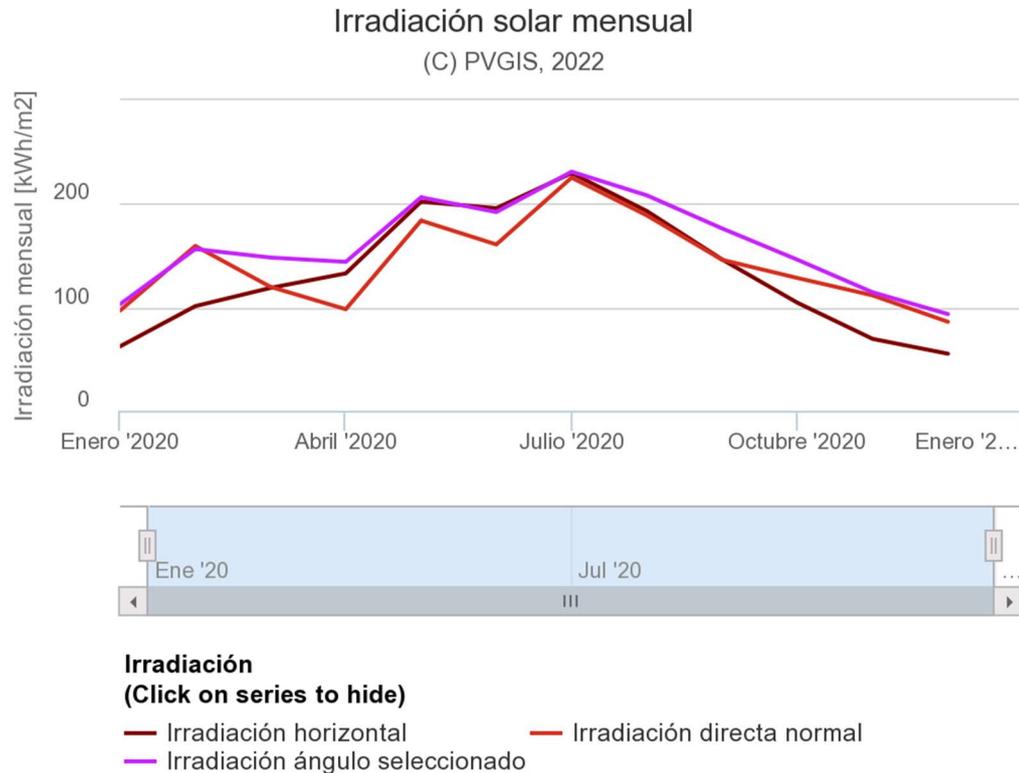


Figura 3.69. Radiación mensual. Fuente: PVGIS

Se opta por ésta 2ª opción, considerándose que ofrece mayor exactitud al estudio. En esta última opción se obtienen valores superiores a los calculados mediante el factor K. En la Tabla 3.65 se presenta el estudio energético realizado a partir del consumo, radiación y producción que se prevé tener mensualmente.

Para ello, en primer lugar, se ha obtenido del PVGIS la irradiancia por hora y mes en la zona donde se prevé instalar la planta fotovoltaica (Tabla 3.63) y en base a estos valores se simula la producción (Tabla 3.62), con la siguiente expresión:

$$E = P * \frac{G_{ef}}{G_{stc}} * PR \quad (3.33)$$

Ecuación 3.33. Producción solar anual

Siendo:

- E=Producción (kWh)
- P=Potencia pico (kWp)

- G_{ef} = Radiación en ángulo establecido en el periodo de estudio (hora, mes, año).
- G_{stc} =Radiación a las condiciones STC (1000 W/m^2)
- PR= Performance Ratio. Se incluye dentro de este valor las pérdidas de la instalación.

Tabla 3.63. Radiación por hora y mes. Fuente elaboración propia

Mes /Hora	G (30°) (W/m ²) - ZONA SALA TÉCNICA- boca sur											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
7:00	0	0	3,24	0	21,35	0	0	0	0	0	0	0
8:00	0	7,51	52,3	44,09	75,55	36,05	24,26	1,11	26,54	0,54	11,73	0
9:00	32,26	137,7	358,55	158	294,62	86,77	76,02	53,54	80,17	49,9	270,76	112,2
10:00	370,98	467,63	558,98	425,87	488,18	318,05	304,67	225,01	455,62	370,67	427,8	377,72
11:00	518,81	634,92	717,39	608,79	655,88	512,21	512,74	484,84	636,65	542,55	564,7	523,72
12:00	620,97	744,19	811,83	727,91	765,44	678,78	696,04	675,14	794,57	692,18	643,2	618,57
13:00	647,21	771,41	775,81	785,16	830,19	801,57	836,3	826,65	878,82	766,29	651,16	642,52
14:00	618,1	725	756,42	774,9	824,01	867,25	934,43	905,41	875,41	761,35	582,78	589,55
15:00	528,41	621,26	651,08	707,52	743,08	872,19	946,89	928,1	801,39	691,46	462,25	473,31
16:00	228,19	468,21	496,25	602,41	639,29	818,45	887,07	871,98	655,21	551,64	62,82	48,76
17:00	24,73	58,78	234,83	466,19	494,22	685,69	776,65	759,18	490,65	381,34	15,62	2,57
18:00	0	9,02	46,39	308,59	337,28	552,37	613,15	598,37	224,15	54,62	0	0
19:00	0	0	0,23	82,96	176,18	385,48	428,52	394,86	51,2	4,59	0	0
20:00	0	0	0	17,55	45,98	214,32	236,27	150,7	1,82	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0,36	65,09	63,03	37,39	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	10,12	8,28	0,05	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÁXIMO	647,21	771,41	811,83	785,16	830,19	872,19	946,89	928,1	878,82	766,29	651,16	642,52
TOTAL (W/m²)	3589,66	4645,63	5463,3	5709,94	6391,61	6904,39	7344,32	6912,33	5972,2	4867,13	3692,82	3388,92

Tabla 3.64. Simulación de Producción por hora y mes. Fuente: elaboración propia

Mes/Hora	Producción E(kWh) - ZONA SALA TÉCNICA- boca sur											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00	0	0	0,05	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0
8:00	0	0,12	0,80	0,68	1,16	0,55	0,37	0,02	0,41	0,01	0,18	0
9:00	0,49	2,11	5,49	2,42	4,51	1,33	1,16	0,82	1,23	0,76	4,15	1,72
10:00	5,68	7,16	8,56	6,52	7,48	4,87	4,67	3,45	6,98	5,68	6,55	5,78
11:00	7,95	9,72	10,99	9,32	10,05	7,84	7,85	7,43	9,75	8,31	8,65	8,02
12:00	9,51	11,40	12,43	11,15	11,72	10,40	10,66	10,34	12,17	10,60	9,85	9,47
13:00	9,91	11,81	11,88	12,03	12,71	12,28	12,81	12,66	13,46	11,74	9,97	9,84
14:00	9,47	11,10	11,58	11,87	12,62	13,28	14,31	13,87	13,41	11,66	8,93	9,03
15:00	8,09	9,51	9,97	10,84	11,38	13,36	14,50	14,21	12,27	10,59	7,08	7,25
16:00	3,49	7,17	7,60	9,23	9,79	12,53	13,59	13,35	10,03	8,45	0,96	0,75
17:00	0,38	0,90	3,60	7,14	7,57	10,50	11,89	11,63	7,51	5,84	0,24	0,04
18:00	0	0,14	0,71	4,73	5,17	8,46	9,39	9,16	3,43	0,84	0	0
19:00	0	0	0,00	1,27	2,70	5,90	6,56	6,05	0,78	0,07	0	0
20:00	0	0	0	0,27	0,70	3,28	3,62	2,31	0,03	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0,01	1,00	0,97	0,57	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0,15	0,13	0,00	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.65. Estudio energético. Fuente: elaboración propia

Performance ratio (PR)	86,65%
Potencia Pico del sistema (kWp)	17,68

Mes	Consumo (túnel de Erinyà)		Radiación solar		Producción	
	kWh/día	kWh/mes	kWh/día	kWh/mes	kWh/día	kWh/mes
Enero	573,39	17.775,09	3,59	111,28	54,98	1.704,29
Febrero	573,39	16.054,92	4,65	130,08	71,15	1.992,19
Marzo	608,58	18.865,98	5,46	169,36	83,67	2.593,85
Abril	626,18	18.785,25	5,71	171,30	87,45	2.623,50
Mayo	643,77	19.956,87	6,39	198,14	97,89	3.034,59
Junio	643,77	19.313,10	6,90	207,13	105,74	3.172,30
Julio	643,77	19.956,87	7,34	227,67	112,48	3.486,91
Agosto	643,77	19.956,87	6,91	214,28	105,87	3.281,82
Septiembre	626,18	18.785,25	5,97	179,17	91,47	2.744,00
Octubre	590,99	18.320,54	4,87	150,88	74,54	2.310,80
Noviembre	555,80	16.673,85	3,69	110,78	56,56	1.696,71
Diciembre	555,80	17.229,65	3,39	105,06	51,90	1.608,98
TOTAL		221.674,23		1.975,13		30.249,94

Según los resultados de la simulación, se espera que la producción anual de la instalación fotovoltaica sea de 30,25 MWh anuales.

De los resultados aportados en la Tabla 3.65, se puede concluir que, los consumos en el túnel son elevados, y que para cubrir todo el consumo con energía solar fotovoltaica se requiere de una potencia pico de 130 kWp. En este caso en concreto, la superficie disponible ha limitado la instalación de mayor número de módulos fotovoltaicos.

Para cuantificar la aportación energética de la instalación fotovoltaica atendiendo al consumo del túnel, se han elaborado una serie de tablas y gráficas para su mejor visualización y análisis. Se muestra a modo de ejemplo, las gráficas y tablas correspondientes al mes de julio. En el anexo II, se adjunta los resultados obtenidos para el resto de meses.

Tabla 3.66. Estudio energético (julio). Fuente: elaboración propia

Mes /hora	JULIO				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Permanente	% del consumo con FV	% del consumo con Comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,37	30,015	9,3	1,24%	98,76%
09:00	1,16	30,015	9,3	3,88%	96,12%
10:00	4,67	30,015	9,3	15,55%	84,45%
11:00	7,85	30,015	9,3	26,16%	73,84%
12:00	10,66	30,015	9,3	35,52%	64,48%
13:00	12,81	57,27	9,3	22,36%	77,64%
14:00	14,31	57,27	9,3	24,99%	75,01%
15:00	14,50	57,27	9,3	25,32%	74,68%
16:00	13,59	30,015	9,3	45,26%	54,74%
17:00	11,89	30,015	9,3	39,63%	60,37%
18:00	9,39	30,015	9,3	31,29%	68,71%
19:00	6,56	30,015	9,3	21,87%	78,13%
20:00	3,62	30,015	9,3	12,06%	87,94%
21:00	0,97	30,015	9,3	3,22%	96,78%
22:00	0,13	12,42	9,3	1,02%	98,98%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%

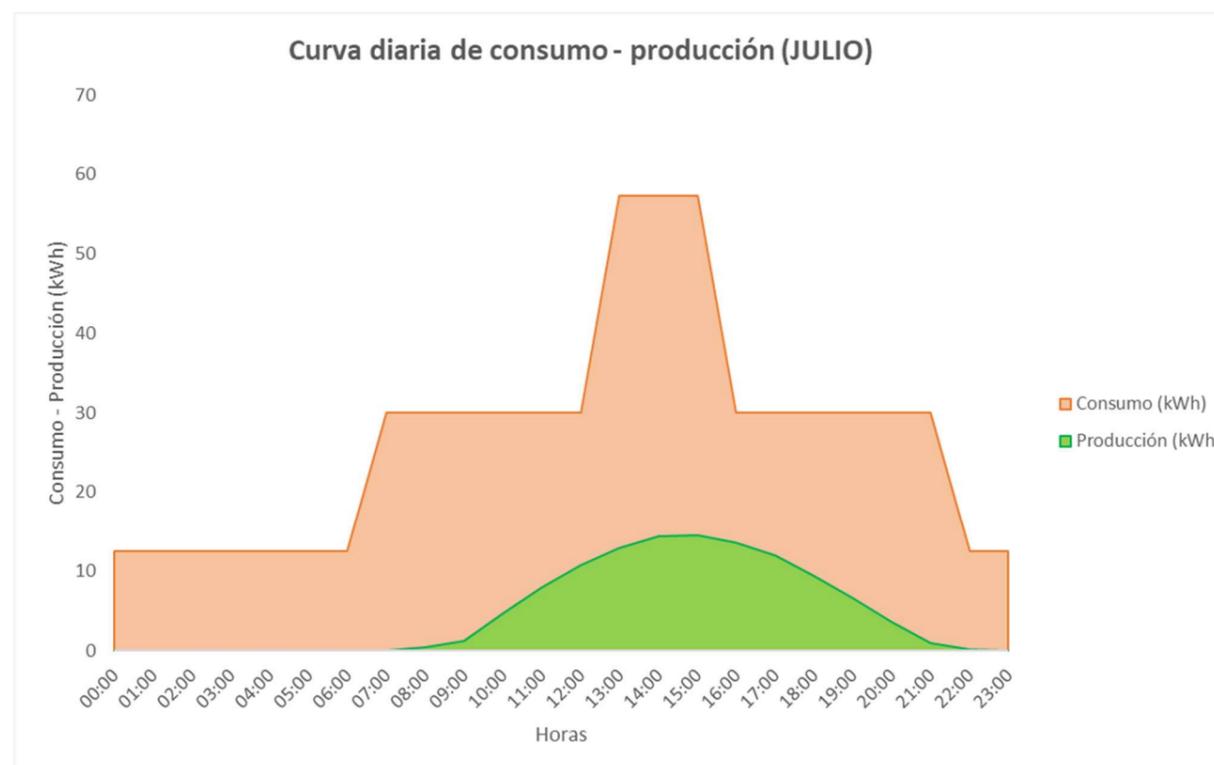


Figura 3.70. Datos de consumo y producción fotovoltaica (julio)

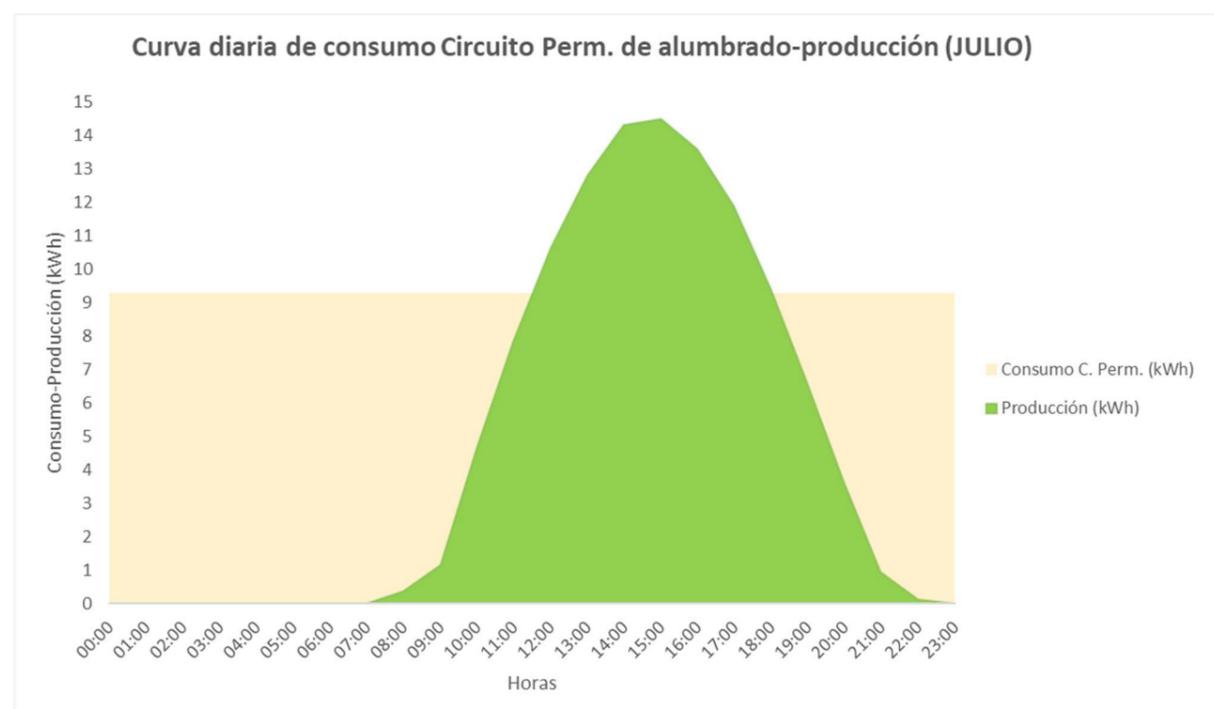


Figura 3.71. Datos de consumo del circuito Permanente y producción fotovoltaica (julio)

En la Tabla 3.66 y Figura 3.71, se analiza la producción y consumos horarios que se prevén para el mes de julio.

Para una mejor visualización y contextualización de la producción que se obtiene en relación a determinados consumos del túnel, se muestra en la Figura 3.71 la relación entre el consumo de los circuitos correspondientes al alumbrado permanente del túnel y la producción fotovoltaica. Como se puede apreciar, se llegaría a cubrir sobradamente la totalidad de dicho consumo en las horas centrales del día durante todos los meses del año.

En la Figura 3.72, se representa el tanto por ciento de cada suministro eléctrico (por compañía eléctrica y por la instalación FV) que abastece a las instalaciones del túnel en función de la hora en el mes de julio:

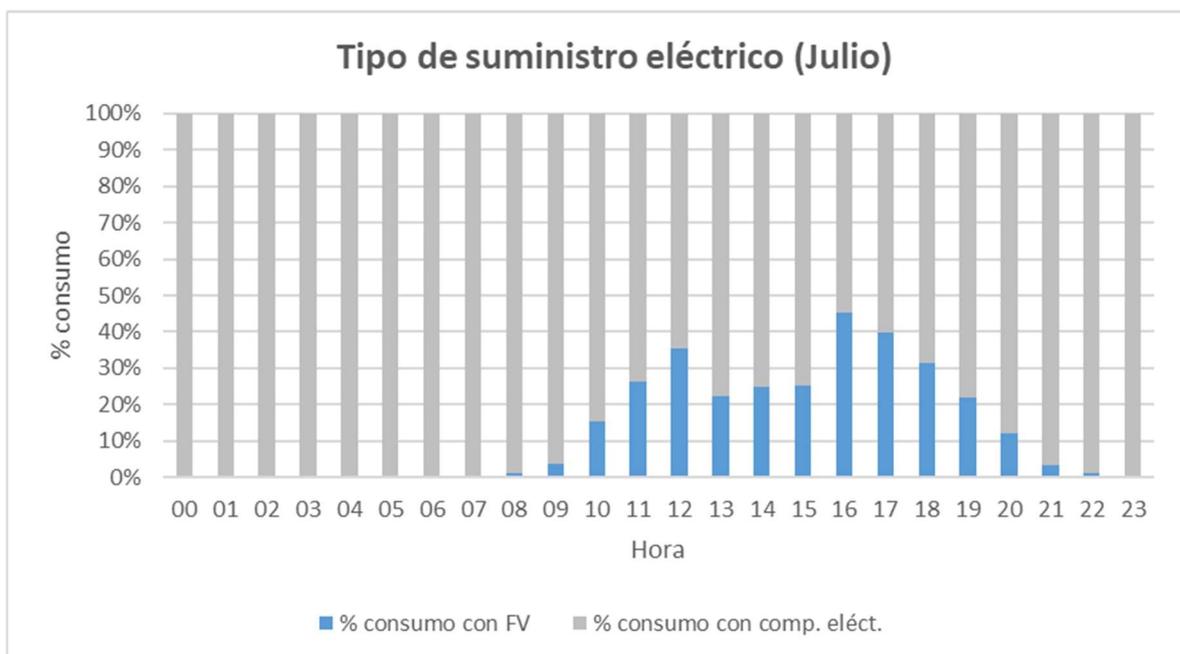


Figura 3.72. % de Fuente de suministro eléctrico en cada hora en día normal (julio). Fuente: elaboración propia

3.4.9 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE SOFTWARES DE DISEÑO

De cara a contrastar y verificar los resultados obtenidos, se realiza una serie de simulaciones mediante el diseño de la instalación fotovoltaica a través de diferentes softwares de diseño específicos para plantas fotovoltaicas.

3.4.9.1 SOFTWARE PVGIS

Anteriormente, se ha utilizado el software PVGIS para la obtención de diferentes datos relacionados con la radiación solar. Esta herramienta, ofrece entre sus funcionalidades, la simulación de un sistema fotovoltaico, aportando diferentes resultados, entre los que se encuentra la producción de energía que se prevé obtener de manera mensual. Es una herramienta usualmente utilizada en las primeras fases del diseño, para disponer de una primera aproximación de la producción de energía que se puede llegar a obtener. En fases posteriores, se deberían utilizar softwares más sofisticados.

En la Figura 3.73 se presenta la pantalla del PVGIS, donde se puede visualizar los datos de entrada introducidos:

Figura 3.73. Simulación PVGIS

A continuación, se presentan los resultados de producción de energía mensual que ofrece dicha herramienta:

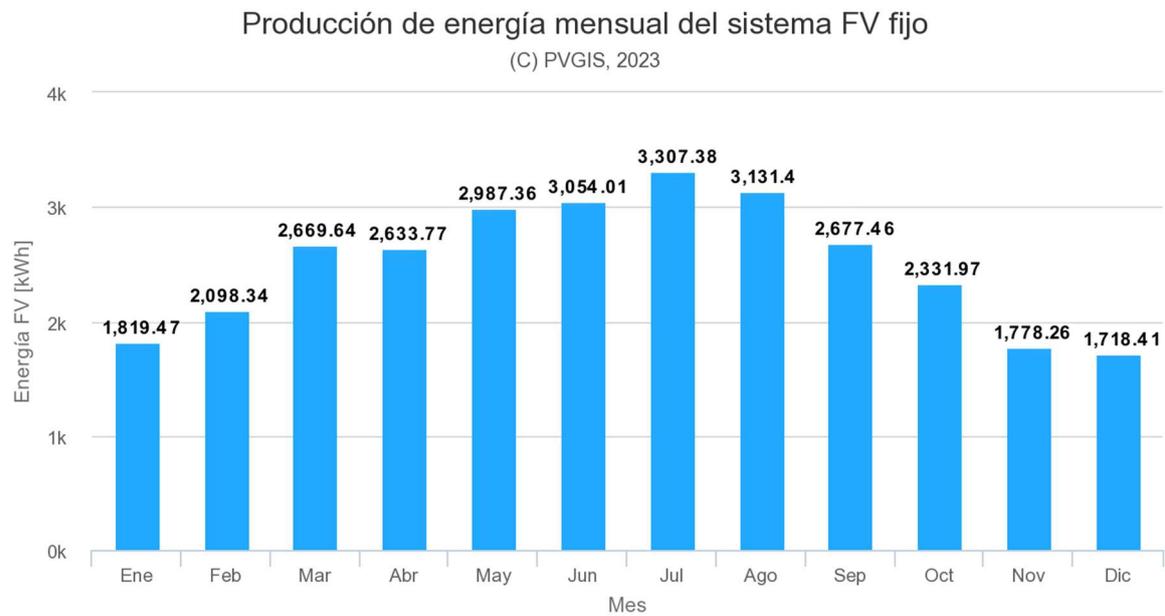


Figura 3.74. Producción de energía a través de PVGIS

Según los resultados de la simulación, se espera que la producción anual de la instalación fotovoltaica sea de 30,21 MWh anuales. Como era de esperar, el resultado es similar al obtenido anteriormente, ya que la base de datos de irradiancia es la misma y se deben introducir las pérdidas del sistema manualmente. Esta funcionalidad de este software es muy válida a la hora de realizar prediseño, donde se puede obtener de manera rápida la producción de energía variando determinados factores básicos como: la potencia pico, pérdidas, inclinación, orientación y el tipo de módulo y montaje.

En el anexo III, se incluye el informe de resultados que se obtiene del PVGIS.

3.4.9.2 HELIOSCOPE

La herramienta HelioScope ofrece diseño especializados para hacer prediseños de sistemas fotovoltaicos, ya que realiza lo que es el análisis de sombras, cálculo de rendimiento de energía, simplificando lo que es el proceso de ingeniería. El producto permite generar diseños, opción que en PVGIS no se permite. Se encuentra disponible en la web, sin necesidad de la descarga de un software. Dispone de una potente base de datos de gran variedad de fabricantes de módulos e inversores.

La herramienta dispone de cuatro bloques de entrada de datos:

- Mechanical: se introduce la superficie disponible y todo lo referente al módulo fotovoltaico: modelo de módulo y potencia, separación entre filas (calculado con anterioridad para evitar la aparición de sombras propias), orientación e inclinación y separación entre los módulos, etc.

En la base de datos de esta herramienta se dispone del módulo considerado en el estudio: JA SOLAR, modelo JAM66S30-505/MR.

- Keepouts: se introduce la geometría de aquellos elementos u obstáculos externos que pudieran generar sombras a la planta fotovoltaica.
- Electrical: en este bloque se introducen las características eléctricas, tanto la parte en corriente continua como la parte de alterna. Se introduce también el número y tipo de inversor.

En la base de datos de esta herramienta se dispone del módulo considerado en el estudio: HUAWEI, modelo SUN2000-17KTL-M0.

La propia herramienta calcula los strings a partir de las premisas introducidas.

- Advanced: en el último bloque se puede seleccionar la estación meteorológica más cercana entre la registradas en la herramienta y hacer una simulación de las sombras que se pueden obtener en los diferentes módulos, seleccionado si se quiere tener en cuenta para el cálculo de la producción.

Se puede apreciar la interfaz de HelioScope en la Figura 3.75. Como contraste del estudio realizado con anterioridad, se puede visualizar que la herramienta ha propuesto una configuración de módulos similar a la considerada.

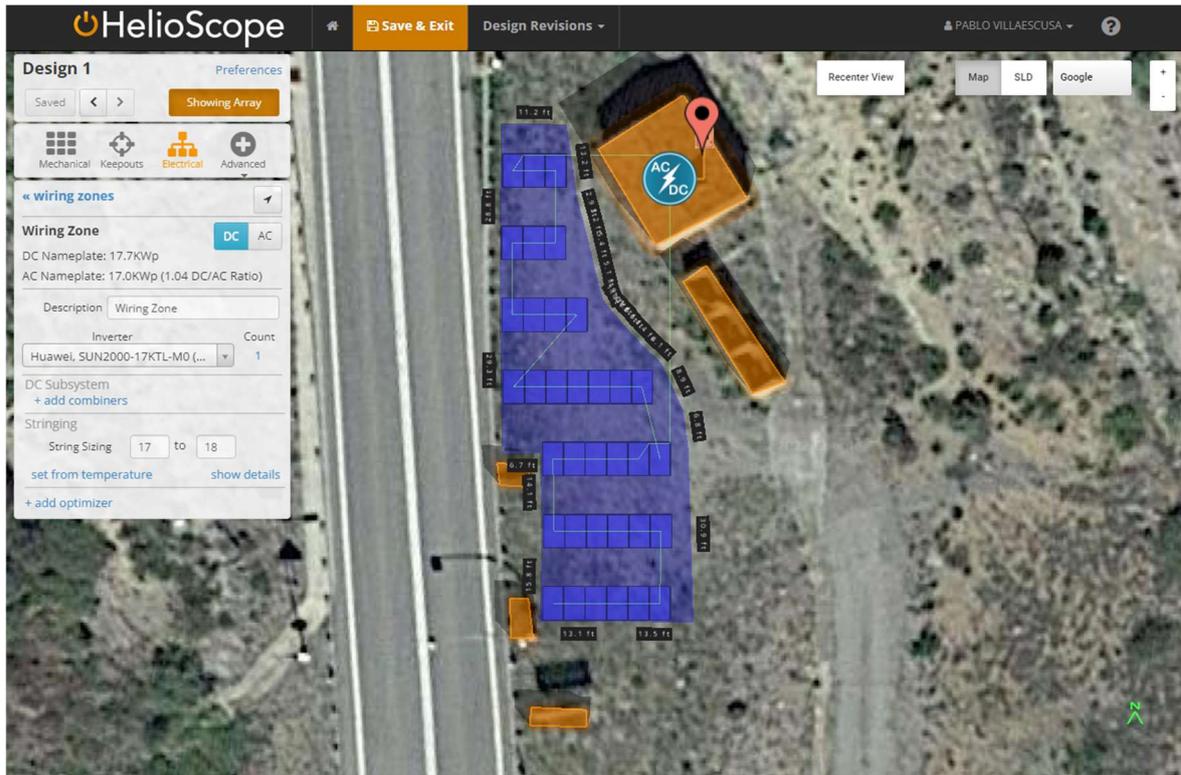


Figura 3.75. Simulación en HelioScope

Debido a todos los datos que se solicita, para realizar una primera simulación de producción de la planta fotovoltaica, se debe haber realizado un previo dimensionamiento de la instalación. Una vez que se introducen todos los datos por la herramienta, se realiza la simulación de la planta.

A continuación, se presentan los resultados de producción de energía mensual que ofrece esta herramienta:

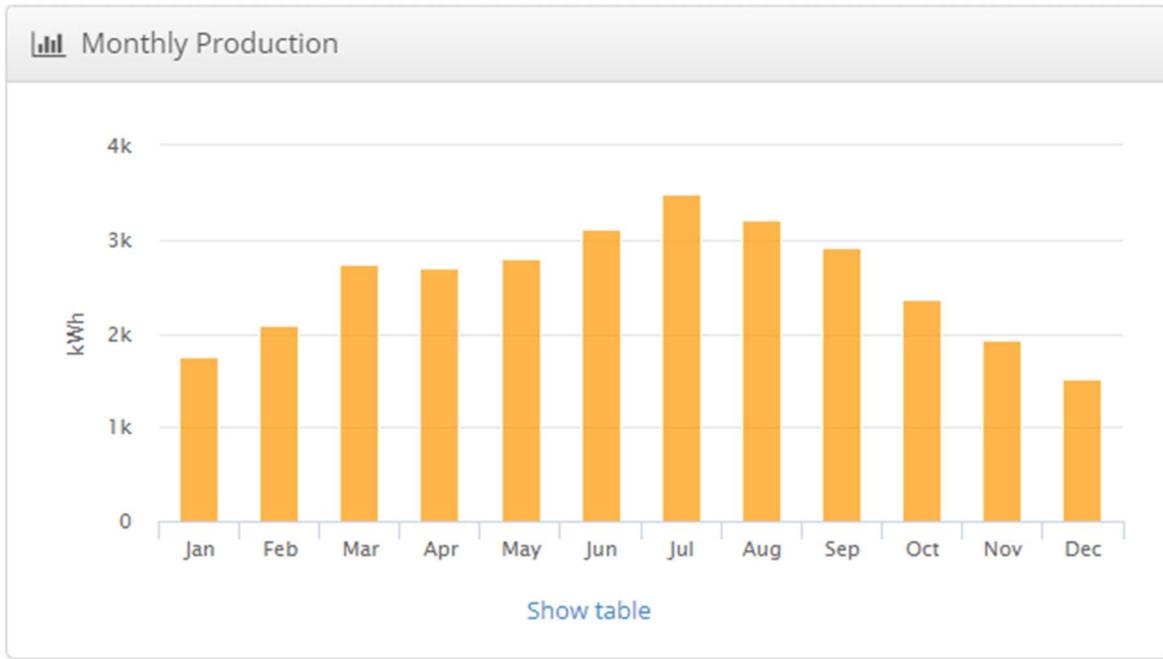


Figura 3.76. Producción de energía a través de HelioScope

Según los resultados de la simulación, se espera que la producción anual de la instalación fotovoltaica sea de 30,6 MWh anuales.

En el anexo IV, se incluye el informe de resultados que se obtiene de HelioScope.

3.4.9.3 SOFTWARE PVSYST

Por último, se ha utilizado el software PVSYST versión 7.3. Es la herramienta más utilizada a la hora del cálculo de la energía producida en sistemas fotovoltaicos.

En la base de datos del programa no se encuentra registrada una localización cercana al túnel de Erinyà. El programa permite introducir cualquier punto geográfico y dependiendo de la localización se dispone de diferentes bases de datos para su uso. De cara al análisis se ha realizado la posterior simulación con dos de las bases de datos existentes: NASA y PVGIS.

Se ha definido el campo fotovoltaico con el tipo y número de módulos en serie y paralelo y el tipo de inversor.

En la base de datos de PVSyst no se encuentra el módulo seleccionado, por lo que se ha tenido que incluir. En la siguiente figura, se muestra una de las pantallas de datos de entrada:

Definición de un módulo FV

Datos básicos | Tamaños y tecnología | Parámetros del modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Modelo: JAM66S30-505/MR Fabricante: JA SOLAR
Nombre de archivo: JAM66S30-505.MR.PAN Fuente datos: Manufacturer

Potencia nom. (en STC): 505.0 Wp Tol. -/+ 0.0 0.1 %
Tecnología: Si-mono

Especificaciones del fabricante o otras medidas

Condiciones de referencia	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	14.000	A	Circuito abierto Voc	45.72	V
Punto de Potencia máx.	Imp	13.110	A	Vmpp	38.53	V
Coeficiente de temperatura	muIsc	6.3	mA/°C	Núm células en serie	66	en series
	o muIsc	0.045	%/°C			

Resumen del modelo

Parámetros principales

Derivación R	400 Ω
Rderiv(G=0)	1600 Ω
Modelo serie R	0.18 Ω
Serie R máx.	0.19 Ω
Serie R aparente	0.30 Ω

Parámetros del modelo

Gamma	0.988
IoRef	0.02 nA
muVoc	-133 mV/°C
muPMax fijo	-0.35 /°C

Herramienta de resultado del modelo interno

Condiciones de operación	GOper	1000	W/m ²	TOper	25	°C
Punto de Potencia máx.	Pmpp	505.9	W	Coef. temper.	-0.34	%/°C
Corriente	Imp	13.31	A	Voltaje Vmpp	38.0	V
Corriente de cortocircuito	Isc	14.00	A	Circuito abierto Voc	45.7	V
Eficiencia	/ Área células	23.40	%	/ Área módulo	21.31	%

Mostrar optimización | Copiar a la tabla | Imprimir | Cancelar | OK

Figura 3.77. Introducción de modelo de módulo en PVSyst

En cambio, el modelo del inversor sí se encontraba registrado en la base de datos del programa.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de la estimación de la producción anual que se ha realizado con el programa PVSyst para ambas bases de datos:

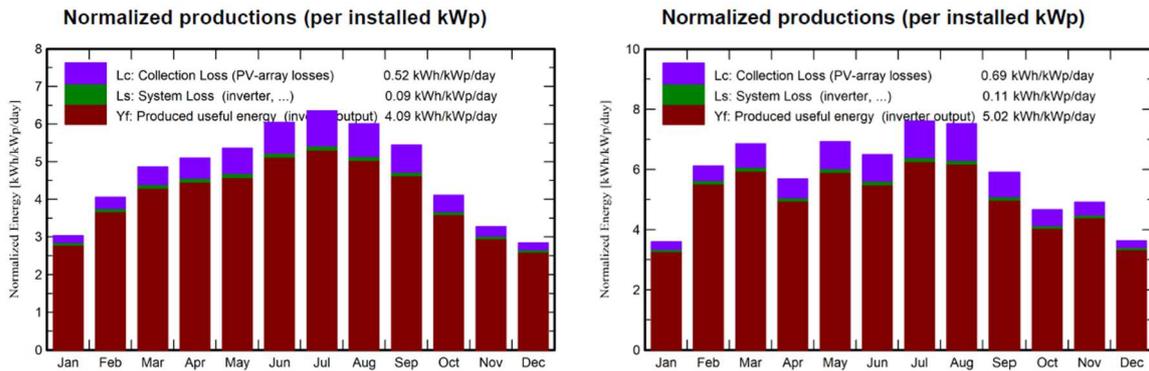


Figura 3.78. Producción de energía a través de PVSyst (izq.BD:NASA /dcha.BD:PVGIS)

Según los resultados de la simulación, se espera que la producción anual de la instalación fotovoltaica sea de 26,4 MWh/anales (BD=NASA) y de 32,42 MWh/anales (BD=PVGIS).

De cara a un análisis con mayor profundidad del PR, el software PVSyst aporta valores mensuales. Se puede observar en la Figura 3.79, a modo de ejemplo, los resultados de la simulación realizada con BD de PVGIS:

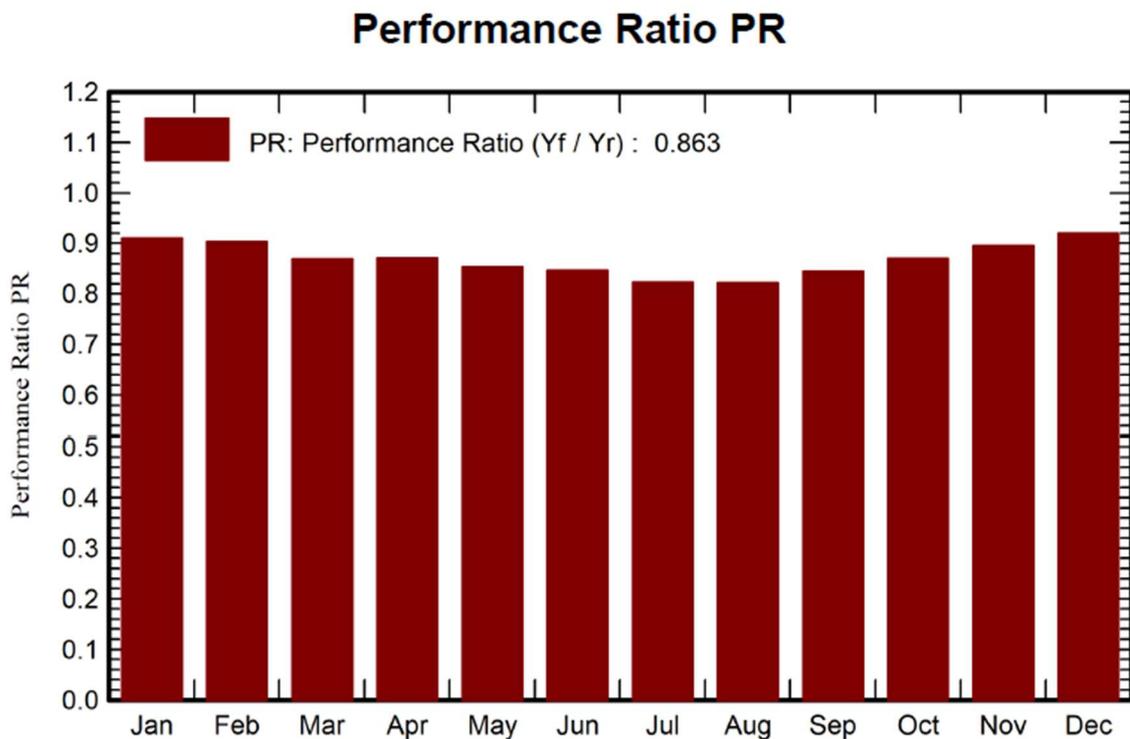


Figura 3.79. PVSyst. Performance Ratio (PR).

Como se ha puede apreciar en los resultados mostrados, la selección de la base de datos climática tiene una fuerte influencia en el nivel de producción.

En el anexo IV, se incluye el informe de resultados que se obtiene de PVSyst, donde se incluye la siguiente información:

- En la página 2 del presente documento, las principales características de la instalación, con los datos geográficos del emplazamiento, cuya fuente se han extraído los datos meteorológicos, la orientación e inclinación del campo con sus principales características de configuración (serie/paralelo).
- En las páginas 3 y 4 del presente documento, se puede observar las características de la planta fotovoltaica (configuración de módulos e inversor) y resumen de pérdidas en función de la inclinación de los módulos.
- En la página 5 del presente documento, el informe muestra las producciones normalizadas y el rendimiento del Performance Ratio. También muestra los principales balances de energía.
- En la página 6 del presente documento, se muestra un gráfico con el diagrama de Sankey. En él se puede observar con claridad las distintas pérdidas que sufre la instalación solar fotovoltaica, con las diferentes causas (pérdidas por mala orientación, por el rendimiento de los módulos fotovoltaicos, de los inversores....). Este diagrama es un indicador muy visual de la calidad del sistema dimensionado.
- En la página 7 del presente documento, se muestra dos gráficos de resultados de la simulación: El gráfico de la parte superior “Diagrama de entrada/ salida diaria”, muestra la energía que se inyectó a la red en función de la irradiación global incidente diariamente. El gráfico de la parte inferior nos muestra la distribución de potencia de salida del sistema a la red.

3.4.9.4 COMPARATIVA DE RESULTADOS

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos tras la simulación de la planta fotovoltaica en los tres softwares de cálculo indicados (PVGIS, HELIOSCOPE y PVSYSYSTEM), y se contrasta con los resultados obtenidos de producción en el Estudio energético.

Tabla 3.67. Resultados de producción de energía con diferentes herramientas de cálculo. Fuente: elaboración propia

	Producción de energía (E) [kWh]				
	Estudio energético	PVGIS	HELIOSCOPE	PVSYSTEM (BD meteo:NASA)	PVSYSTEM (BD meteo:PVGIS)
Enero	1.704	1.820	1.750	1.529	1792
Febrero	1.992	2.098	2.095	1.820	2733
Marzo	2.594	2.670	2.732	2.358	3263
Abril	2.623	2.634	2.694	2.369	2627
Mayo	3.035	2.987	2.804	2.515	3236
Junio	3.172	3.054	3.117	2.718	2915
Julio	3.487	3.307	3.484	2.911	3432
Agosto	3.282	3.131	3.218	2.761	3388
Septiembre	2.744	2.678	2.909	2.455	2644
Octubre	2.311	2.332	2.369	1.971	2222
Noviembre	1.697	1.778	1.932	1.570	2332
Diciembre	1.609	1.718	1.518	1.424	1831
Total	30.250	30.208	30.621	26.403	32.415

Se presenta la siguiente gráfica con los resultados de la simulación en cada una de las herramientas de cálculo:

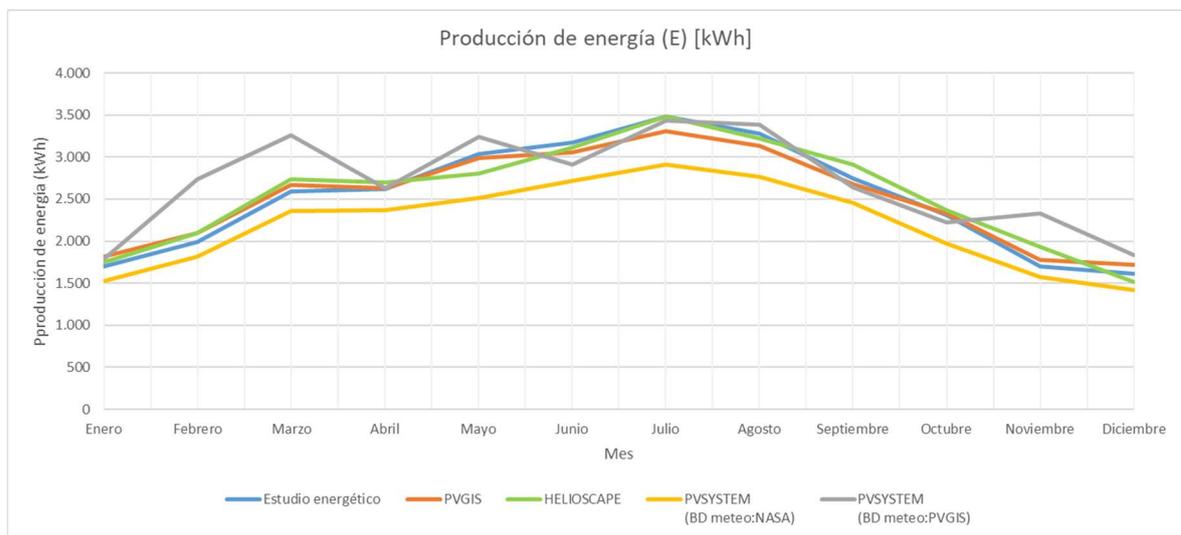


Figura 3.80. Resultados de producción de energía con diferentes herramientas de cálculo. Fuente: elaboración propia

Tras los resultados obtenidos se puede apreciar que con los programas PVGIS y HELIOSCOPE se obtienen valores de producción de energía similares al estudio energético

realizado, y que con el PVSyst hay una diferencia, que varía en función de la base de datos climática elegida.

Esto puede deberse a diferentes factores, entre los que se encuentra en la simulación de las pérdidas, o los valores de irradiancia difusa o albedo tenidos en cuenta en cada software.

En cualquier caso, se puede verificar que el estudio energético aporta resultados fiables y que actualmente, se dispone de una oferta comercial de software de cálculo muy amplia para desarrollar estudios fotovoltaicos con una precisión muy elevada, acortando los tiempos de prediseño y dimensionamiento.

4 Conclusiones

4.1 SISTEMA DE VENTILACIÓN

Según la definición de la PIARC, el objetivo del sistema de ventilación en caso de incendio tiene los siguientes objetivos:

- Salvar vidas facilitando la evacuación de las personas.
- Facilitar la operación de rescate y extinción.
- Evitar el riesgo de explosiones.
- Limitar los daños a la estructura y equipamiento del túnel.

Con el estudio realizado, se ha demostrado que en incendios de potencias de hasta 100 MW, se consiguen los objetivos planteados a la hora de dimensionar un sistema de ventilación.

A lo largo del documento, se han presentado los condicionantes a tener en cuenta en el estudio del sistema de ventilación y los criterios más importantes que suelen determinar el dimensionamiento del mismo en este tipo de soluciones.

Adicionalmente se han realizado diferentes consideraciones acerca de la solución estudiada, valorando y analizando los resultados empleando para ello modelos unidimensionales.

Para ello, en primer lugar, se ha calculado el número de ventiladores necesarios en la posición de incendio más desfavorable en régimen estacionario, quiere decir cuando el incendio está completamente desarrollado. Posteriormente, como verificación, se ha evaluado el comportamiento del humo en régimen transitorio. Así, la velocidad del aire de ventilación en el interior del túnel se calcula para cada instante de tiempo admitiendo como hipótesis que los efectos de la compresibilidad del aire pueden despreciarse y combinando las ecuaciones del movimiento para cada sección suponiendo la continuidad de la presión y el caudal. En esta parte del estudio, se ha empleado el software CAMATT, programa

específico para llevar a cabo simulaciones de fuego en túneles mediante modelos unidimensionales.

Por lo tanto, como conclusión de los escenarios analizados, se propone la instalación de un sistema de ventilación longitudinal compuesto por un total de 8 ventiladores reversibles de 55 kW posicionados en parejas en la clave del túnel.

Esta solución permite garantizar unas excelentes condiciones de seguridad para unas condiciones muy desfavorables (de tiro natural, posición del incendio, tráfico, etc.) en caso de producirse un incendio muy importante (habitualmente expresados como incendio de 100 MW) y unas condiciones de seguridad razonables incluso para incendios de una gran magnitud (incendio de 200 MW).

Se presenta como resumen del sistema de ventilación propuesto, la siguiente tabla, con las características más relevantes del túnel y de la solución obtenida:

Tabla 4.1. Características más relevantes del sistema de ventilación propuesto

DATOS GENERALES		
Nombre	Túnel de Erinyà	
Tipo de tráfico	Bidireccional	
Velocidad máxima autorizada	80	km/h
DATOS GEOMÉTRICOS		
Longitud	630	m
Pendiente media	2,1	%
Anchura total	10,75	m
Área de la sección	72,75	m ²
DATOS DE TRÁFICO		
Intensidad Media Diaria (IMD)	1.657	veh/d
% vehículos pesados	4,85	%
Intensidad de hora punta (IHP)	sentido 1	100 veh/h
	sentido 2	82 veh/h
DATOS DIMENSIONAMIENTO SISTEMA DE VENTILACIÓN		
Potencia de incendio de diseño	100	MW
Velocidad de diseño (velocidad crítica)	2,8	m/s
Velocidad del viento exterior	5	m/s
DATOS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN PROPUESTO		
Tipo de ventilación	Longitudinal	
Número de ventiladores	8 (colocados en parejas)	uds
Potencia unitaria	55	kW
Empuje Teórico	1.865	N
Velocidad de chorro	38	m/s
Temperatura límite de resistencia del ventilador	400/2h	
Interdistancia entre ventiladores	Entre parejas: 1-2:100m / 2-3:200 m / 3-4:100 m	
Potencia total instalada	440	kW

4.2 INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Con los resultados expuestos se puede concluir que, pese al gran consumo eléctrico que se dispone en el túnel caso de estudio, la instalación fotovoltaica propuesta cubre una parte significativa del mismo, lo que comportará una reducción en el consumo de red de la instalación con el consiguiente ahorro económico. Además, cabe remarcar la reducción emisiones de CO₂ debido a tratarse de una instalación sin ningún tipo de emisión a la atmósfera.

Según el estudio energético realizado, la producción anual de energía que se prevé disponer es de 30,25 MWh/año. La mayor producción de esta energía se producirá en el mes de julio (3.486,91 kWh/mes), mientras que la mínima será en el mes de diciembre (1.608,98 kWh/mes). El rendimiento final del sistema será de 1.711,46 kWh/kWp/año. El performance ratio (PR) anual será 0,867.

A continuación, se incluye un gráfico con la producción que se prevé obtener mensualmente:

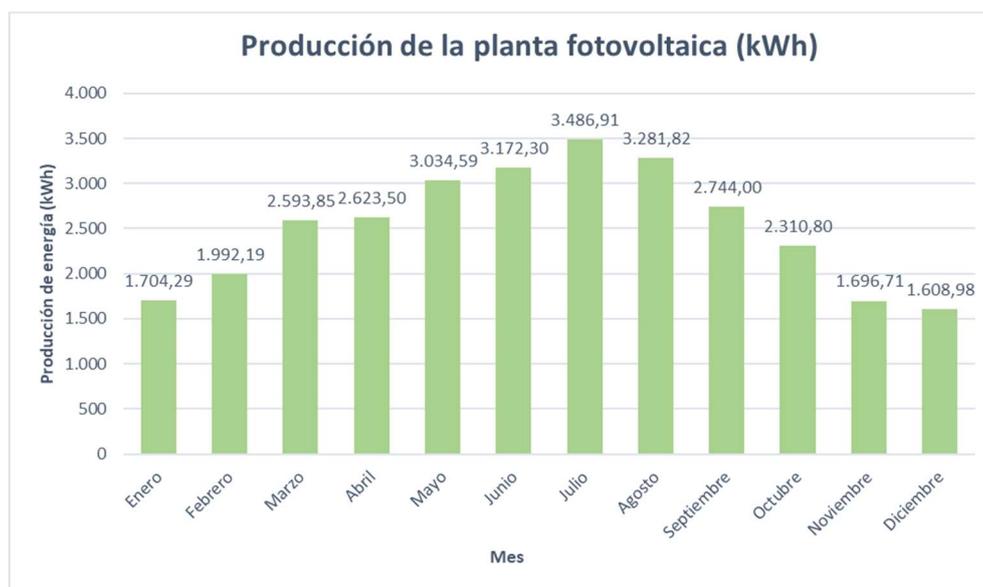


Figura 4.1. Producción de la planta fotovoltaica a través del estudio energético. Fuente: elaboración propia

Como se ha indicado, la producción generada está por debajo del consumo de la iluminación mínima necesaria en el túnel, por lo que no se prevé excedentes en la misma.

En resumen, y como características a destacar, la instalación fotovoltaica estará formada por 35 módulos fotovoltaicos de 505 Wp, distribuidos en 2 strings, siendo la potencia pico resultante de la instalación de 17,68 kWp. La superficie de cada módulo es de 2,10 x 1,14 m, siendo el total de la superficie de captación de 177,6 m². La potencia nominal del inversor trifásico será de 17 kWn.

Se presenta como resumen de la instalación fotovoltaica propuesta, la siguiente tabla, con las características más relevantes de la misma:

Tabla 4.2. Características más relevantes de la planta fotovoltaica

DATOS GENERALES ARQUITECTÓNICOS		
Tipo	Sobre terreno. Estructura inclinada	
Inclinación	30	°C
Orientación (azimut)	0 (sur)	°C
TIPO DE INSTALACIÓN		
Tipología	Autoconsumo sin excedentes	
DATOS PLANTA FOTOVOLTAICA		
Potencia pico	17,68	kWp
Potencia nominal	17	kWn
Factor de escala	1,04	
INVERSOR DE POTENCIA		
Número de inversores de potencia	1	uds
Número de MPPT	2	uds
Potencia nominal	17	kW
Tensión de salida	230/400	V
Tipo de red	Trifásica	
Frecuencia	50	Hz
Tensión de entrada máximo	1.080	V
Tensión de entrada mínima de arranque	200	V
PLANTA FOTOVOLTAICA		
Número total de módulos	35	uds
Potencia módulo	505	Wp
Tipo tecnología	Monocristalino de silicio PERC. Half cell	
Composición de los módulos	2 strings de 18 y 17 módulos	
Superficie total de captación	177,6	m ²
Intensidad en punto de máxima potencia del módulo	13,11	A
Tensión en punto de máxima potencia del módulo	38,53	V
Intensidad de corto circuito	14,00	A
Voltaje de circuito abierto módulo	45,72	V
Estimación de energía generada	27.527	kWh/año
Performance Ratio	86,65	%
Rendimiento final del sistema	1.711,46	kWh/kWp/añal

Como conclusión general, se considera que las soluciones expuestas cumplen con los objetivos establecidos, obteniendo una mejora de la seguridad y de la eficiencia energética en un túnel de carretera.

Por un lado, el sistema de ventilación propuesto mejora considerablemente la seguridad del túnel respecto a las condiciones actuales, teniendo la posibilidad de un control del humo en caso de incendio. Se ha seguido para su diseño los criterios y planteamientos establecidos en las normativas y artículos técnicos publicados por organismos de un reconocido prestigio en materia de seguridad de túneles de carretera, como son la PIARC o el CETU.

Y, por otro lado, en lo que respecta al sistema de generación de energía eléctrica mediante una instalación fotovoltaica, se mejora la eficiencia energética del túnel, reduciendo el elevado consumo permanente existente. Se ha considerado para su implantación aquella zona próxima al túnel con unas mejores condiciones de luz solar, priorizando el rendimiento de la instalación frente a una instalación de mayor superficie y por tanto mayor potencia pico.

Ambas medidas están en línea con los planes de inversión del Gobierno de España, para la mejora en la gestión, seguridad y eficiencia de la red de túneles del Estado, dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) aprobados por la Asamblea General de la ONU, en concreto con el objetivo 9. Industria, innovación e infraestructura, y la correspondiente Agenda 2030.

5 Bibliografía

- [1] E. A. Cáceres Espejo, “Medidas de protección contra incendios en túneles carreteros,” Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2008.
- [2] Comité Técnico AIPCR Explotación de túneles de carretera. and Asociación Mundial de la Carretera., *Explotación de túneles de carretera : Primeros pasos hacia un enfoque sostenible*. AIPCR, 2017.
- [3] Association mondiale de la route. Comité des tunnels routiers., *Guide de bonnes pratiques pour l’exploitation et l’entretien des tunnels routiers = Good practice for the operation and maintenance of road tunnels*. Association mondiale de la route, 2005.
- [4] E. Alonso Pérez De Ágreda, M. Arroyo Álvarez, T. Manuel, and R. Ruiz, “JORNADA TÉCNICA FUEGO EN TÚNELES,” Barcelona, May 2011.
- [5] C. Orta, “Incendios en túneles,” 11. *La intervención en Incendios en túneles. Bomberos de Navarra*, pp. 186–222.
- [6] Asociación Mundial de la Carretera, “Manual de túneles de Carreteras,” <https://tunnelsmanual.piarc.org/>. <https://tunnelsmanual.piarc.org/> (accessed Feb. 07, 2023).
- [7] Comité Técnico AIPCR Explotación de túneles de carretera. and Asociación Mundial de la Carretera., *Explotación de túneles de carretera : Primeros pasos hacia un enfoque sostenible*. AIPCR, 2017.
- [8] Asociación Mundial de la Carretera. and Comité Técnico AIPCR Explotación de Túneles de Carretera., *Integrated approach to road tunnel safety*. AIPCR, 2007.
- [9] Comité Técnico AIPCR Explotación de túneles de carretera. and Asociación Mundial de la Carretera., *Grandes infraestructuras subterráneas interconectadas*. PIARC, 2019.
- [10] Asociación Mundial de la Carretera., *Carreteras de energía positiva*. PIARC, 2019.
- [11] Asociación Mundial de la Carretera. and Comité Técnico AIPCR Explotación de Túneles de Carretera., *Túneles de carretera : Estrategias de control de la ventilación en situación de emergencia*. PIARC, 2011.
- [12] Comité Técnico D.5 Túneles de Carretera (AIPCR), “TÚNELES DE CARRETERA: EMISIONES DE VEHÍCULOS Y DEMANDA DE VENTILACIÓN,” 2019. [Online]. Available: <http://www.piarc.org>

- [13] Asociación Mundial de la Carretera. and Comité Técnico AIPCR Explotación de Túneles de Carretera., *Estrategias de control de la ventilación en situación de emergencia en túneles de carretera*. PIARC, 2011.
- [14] A. Abella, I. García-Arango, and F. Hacar, *Túneles de Carretera: Seguridad, Normativa, Instalaciones y Explotación*. Madrid, 2020.
- [15] SODECA, “Catálogo de Sistemas de ventilación para túneles y obras subterráneas.”
- [16] Diputación Foral de Bizkaia, “Decreto Foral 135/2006, sobre seguridad de túneles en carreteras.” 2006.
- [17] Diputación Foral de Bizkaia, “Decreto Foral de la Diputación Foral de Bizkaia 91/2012, de 24 de abril, por el que se aprueban las Instrucciones Técnicas de Seguridad y Explotación en Túneles,” 2012.
- [18] Ajuntament de Barcelona, “Instrucción técnica de túneles viarios urbanos de la ciudad de Barcelona (ITT),” 2016.
- [19] NFPA: National Fire Protection Association., “NFPA 502:2020 Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways.” 2020.
- [20] MINISTERE DE L’INTERIEUR. MINISTERE DE L’EQUIPEMENT DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, “Circulaire Interministerielle N° 2006-20 DU relative à la sécurité des tunnels routiers,” Mar. 2006.
- [21] Ministerio de Transportes de Colombia, “MANUAL PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES DE CARRETERA PARA COLOMBIA,” Bogotá, Dec. 2021.
- [22] M. Y. A. U. MINISTERIO DE TRANSPORTES, “Tráfico, velocidades, accidentes y tramos de concentración de accidentes,” *Tráfico, velocidades, accidentes y tramos de concentración de accidentes*. <https://www.mitma.gob.es/carreteras/trafico-velocidades-accidentes-y-tramos-de-concentracion-de-accidentes> (accessed Dec. 21, 2022).
- [23] Association mondiale de la route. Comité des tunnels routiers., *Good practice for the operation and maintenance of road tunnels - 12.3 Jet Fan Calculation Procedure*. Association mondiale de la route, 2005.
- [24] Centre d’études des tunnels (France), *Dossier pilote des tunnels. [Document n° 4], Équipements. Section 4.1, Ventilation*. Centre d’études des tunnels, 2003.
- [25] CETU (Centre d’Estudes des Tunnels), “User’s guide CAMATT 2.20,” Nov. 2011. [Online]. Available: www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

- [26] M. y A. U. Ministerio de Transportes, “Base de datos del Observatorio del transporte y la logística en España del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Parque nacional de vehículos por comunidad autónoma, provincia, tipo de vehículo y tipo de carburante,” 2021. <https://apps.fomento.gob.es/bdotle/visorBDpop.aspx?i=396> (accessed Jan. 08, 2023).
- [27] MINISTERE DE L’INTERIEUR. MINISTERE DE L’EQUIPEMENT DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, “CIRCULAIRE INTERMINISTERIELLE N° 2000-63 DU 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national,” Aug. 2000.
- [28] A. Haack, “Fire protection in traffic tunnels: General aspects and results of the EUREKA project,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 377–381, Oct. 1998, doi: 10.1016/S0886-7798(98)00080-7.
- [29] Permanent International Association of Road Congresses. and PIARC Committee on road tunnels (C5), *Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers = Fire and smoke control in road tunnels*. AIPCR, 1999.
- [30] H. Ingason, A. Lönnemark, and Y. Z. Li, *Runehamar Tunnel Fire Tests*. 2011.
- [31] CETU (Centre d’Etudes des Tunnels), “Le Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers. Fascicule 4. Les études spécifiques des dangers (ESD),” 2003. Accessed: Jan. 08, 2023. [Online]. Available: https://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_dossier_securite-Fasc_4_cle0e377a.pdf
- [32] T. y V. Secretaría de Estado de Infraestructuras, “Metodología de Análisis de Riesgo en túneles de la Red de Carreteras del Estado,” May 2012.
- [33] E. Migoya Valor, “MODELO ZONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE HUMOS Y GASES CALIENTES TESIS DOCTORAL,” 2002.
- [34] European Commission, “PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.”
- [35] NASA Langley Research Center (LaRC), “ Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>),” *Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)* .
- [36] AREA TECNOLOGÍA (<https://areatecnologia.com>), “BLOG: INCLINACIÓN, ORIENTACIÓN Y SOMBRAS .” <https://areatecnologia.com>) (accessed Feb. 09, 2023).
- [37] T. & D. S. EADIC Engineering, “Seguidor del punto de máxima potencia MPPT,” Jan. 2021. <https://eadic.com/blog/entrada/seguidor-del-punto-de-maxima-potencia-mppt-que-es-el-mppt/> (accessed Feb. 09, 2023).
- [38] Huawei, “Datasheet_inversor”.

- [39] JASOLAR, “datasheet Módulo fotovoltaico_JASOLAR DEEP BLUE 3.0”.
- [40] IDAE Instituto para la Diversificación, “Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red.” [Online]. Available: www.idae.es

6 Anexos

ANEXO I. CÁLCULOS DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA VENTILACIÓN LONGITUDINAL EN CASO DE INCENDIO.

A.I.1 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 55% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 347 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT. INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot. incendio: 100MW								
347 m	55%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	0,63	969,28	0,02		0,60		0,075	28,37	29,056
55,6%	350	0,63	961,45	0,02		0,59		0,076		0,689
56,3%	355	0,63	959,63	0,02		0,59		0,076		0,687
57,1%	360	0,63	957,83	0,02		0,59		0,076		0,686
57,9%	365	0,63	956,03	0,02		0,59		0,076		0,684
58,7%	370	0,64	954,25	0,02		0,59		0,077		0,682
59,5%	375	0,64	952,48	0,02		0,58		0,077		0,680
60,3%	380	0,64	950,73	0,02		0,58		0,077		0,678
61,1%	385	0,64	948,98	0,02		0,58		0,077		0,677
61,9%	390	0,65	947,25	0,02		0,58		0,077		0,675
62,7%	395	0,65	945,53	0,02		0,57		0,078		0,673
63,5%	400	0,65	943,82	0,02		0,57		0,078		0,671
64,3%	405	0,65	942,12	0,02		0,57		0,078		0,670
65,1%	410	0,65	940,43	0,02		0,57		0,078		0,668
65,9%	415	0,66	938,76	0,02		0,57		0,079		0,666
66,7%	420	0,66	937,10	0,02		0,56		0,079		0,664
67,5%	425	0,66	935,44	0,02		0,56		0,079		0,662
68,3%	430	0,66	933,80	0,02		0,56		0,079		0,661
69,0%	435	0,66	932,17	0,02		0,56		0,080		0,659
69,8%	440	0,67	930,55	0,02		0,56		0,080		0,657
70,6%	445	0,67	928,94	0,02		0,55		0,080		0,655
71,4%	450	0,67	927,35	0,02		0,55		0,080		0,653
72,2%	455	0,67	925,76	0,02		0,55		0,081		0,652
73,0%	460	0,67	924,18	0,02		0,55		0,081		0,650
73,8%	465	0,68	922,62	0,02		0,55		0,081		0,648
74,6%	470	0,68	921,07	0,02		0,54		0,081		0,646
75,4%	475	0,68	919,52	0,02		0,54		0,082		0,645

76,2%	480	0,68	517,99	0,02							
77,0%	485	0,68	516,46	0,02							
77,8%	490	0,69	514,95	0,02							
78,6%	495	0,69	513,45	0,02							
79,4%	500	0,69	511,96	0,02							
80,2%	505	0,69	510,47	0,02							
81,0%	510	0,69	509,00	0,02							
81,7%	515	0,70	507,54	0,02							
82,5%	520	0,70	506,09	0,02							
83,3%	525	0,70	504,65	0,02							
84,1%	530	0,70	503,21	0,02							
84,9%	535	0,70	501,79	0,02							
85,7%	540	0,71	500,38	0,02							
86,5%	545	0,71	498,97	0,02							
87,3%	550	0,71	497,58	0,02							
88,1%	555	0,71	496,19	0,02							
88,9%	560	0,71	494,82	0,02							
89,7%	565	0,72	493,45	0,02							
90,5%	570	0,72	492,09	0,02							
91,3%	575	0,72	490,75	0,02							
92,1%	580	0,72	489,41	0,02							
92,9%	585	0,72	488,08	0,02							
93,7%	590	0,73	486,76	0,02							
94,4%	595	0,73	485,45	0,02							
95,2%	600	0,73	484,14	0,02							
96,0%	605	0,73	482,85	0,02							
96,8%	610	0,73	481,56	0,02							
97,6%	615	0,74	480,29	0,02							
98,4%	620	0,74	479,02	0,02							
99,2%	625	0,74	477,76	0,02							
100,0%	630	0,74	476,51	0,02							
BOCA NORTE					4,71		15,06				19,774
Dp Requerido (Pa)				3,91	7,07	31,10	15,06	16,97	28,37	102,48	
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)	

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	3,91
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	31,10
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	16,97
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	102,48
Total. Dp Ventiladores (Pa)	104,39

Posición de incendio	
347 m	55%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) CORRECTO

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	OFF	415,00	335	435	538,76	0,66	0	0,00
4	ON	515,00	435	535	507,54	0,70	2	22,31
								104,39

A.I.2 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 60% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 378 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT. INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot. incendio: 100MW								
378 m	60%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	0,63	563,28	0,02		0,60		0,075	28,37	29,056
60,3%	380	0,63	561,45	0,02		0,59		0,076		0,689
61,1%	385	0,63	559,63	0,02		0,59		0,076		0,687
61,9%	390	0,63	557,83	0,02		0,59		0,076		0,686
62,7%	395	0,63	556,03	0,02		0,59		0,076		0,684
63,5%	400	0,64	554,25	0,02		0,59		0,077		0,682
64,3%	405	0,64	552,48	0,02		0,58		0,077		0,680
65,1%	410	0,64	550,73	0,02		0,58		0,077		0,678
65,9%	415	0,64	548,98	0,02		0,58		0,077		0,677
66,7%	420	0,65	547,25	0,02		0,58		0,077		0,675
67,5%	425	0,65	545,53	0,02		0,57		0,078		0,673
68,3%	430	0,65	543,82	0,02		0,57		0,078		0,671
69,0%	435	0,65	542,12	0,02		0,57		0,078		0,670
69,8%	440	0,65	540,43	0,02		0,57		0,078		0,668
70,6%	445	0,66	538,76	0,02		0,57		0,079		0,666
71,4%	450	0,66	537,10	0,02		0,56		0,079		0,664
72,2%	455	0,66	535,44	0,02		0,56		0,079		0,662
73,0%	460	0,66	533,80	0,02		0,56		0,079		0,661
73,8%	465	0,66	532,17	0,02		0,56		0,080		0,659
74,6%	470	0,67	530,55	0,02		0,56		0,080		0,657
75,4%	475	0,67	528,94	0,02		0,55		0,080		0,655

76,2%	480	0,67	527,35	0,02							
77,0%	485	0,67	525,76	0,02							
77,8%	490	0,67	524,18	0,02							
78,6%	495	0,68	522,62	0,02							
79,4%	500	0,68	521,07	0,02							
80,2%	505	0,68	519,52	0,02							
81,0%	510	0,68	517,99	0,02							
81,7%	515	0,68	516,46	0,02							
82,5%	520	0,69	514,95	0,02							
83,3%	525	0,69	513,45	0,02							
84,1%	530	0,69	511,96	0,02							
84,9%	535	0,69	510,47	0,02							
85,7%	540	0,69	509,00	0,02							
86,5%	545	0,70	507,54	0,02							
87,3%	550	0,70	506,09	0,02							
88,1%	555	0,70	504,65	0,02							
88,9%	560	0,70	503,21	0,02							
89,7%	565	0,70	501,79	0,02							
90,5%	570	0,71	500,38	0,02							
91,3%	575	0,71	498,97	0,02							
92,1%	580	0,71	497,58	0,02							
92,9%	585	0,71	496,19	0,02							
93,7%	590	0,71	494,82	0,02							
94,4%	595	0,72	493,45	0,02							
95,2%	600	0,72	492,09	0,02							
96,0%	605	0,72	490,75	0,02							
96,8%	610	0,72	489,41	0,02							
97,6%	615	0,72	488,08	0,02							
98,4%	620	0,73	486,76	0,02							
99,2%	625	0,73	485,45	0,02							
100,0%	630	0,73	484,14	0,02							
BOCA NORTE					4,71		15,06				19,774
Dp Requerido (Pa)				4,00	7,07	28,20	15,06	17,50	28,37	100,20	
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)	

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,00
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	28,20
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	17,50
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	100,20
Total. Dp Ventiladores (Pa)	103,95

Posición de incendio	
378 m	60%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) CORRECTO

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	OFF	415,00	335	435	548,98	0,64	0	0,00
4	ON	515,00	435	535	516,46	0,68	2	21,87
								103,95

A.I.3 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 65% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 410 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT.INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot.incendio: 100MW								
410 m	65%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	0,63	563,28	0,02		0,60		0,075	28,37	29,056
65,1%	410	0,63	561,45	0,02		0,59		0,076		0,689
65,9%	415	0,63	559,63	0,02		0,59		0,076		0,687
66,7%	420	0,63	557,83	0,02		0,59		0,076		0,686
67,5%	425	0,63	556,03	0,02		0,59		0,076		0,684
68,3%	430	0,64	554,25	0,02		0,59		0,077		0,682
69,0%	435	0,64	552,48	0,02		0,58		0,077		0,680
69,8%	440	0,64	550,73	0,02		0,58		0,077		0,678
70,6%	445	0,64	548,98	0,02		0,58		0,077		0,677
71,4%	450	0,65	547,25	0,02		0,58		0,077		0,675
72,2%	455	0,65	545,53	0,02		0,57		0,078		0,673
73,0%	460	0,65	543,82	0,02		0,57		0,078		0,671
73,8%	465	0,65	542,12	0,02		0,57		0,078		0,670
74,6%	470	0,65	540,43	0,02		0,57		0,078		0,668
75,4%	475	0,66	538,76	0,02		0,57		0,079		0,666

76,2%	480	0,66	537,10	0,02	0,56	0,079	0,664			
77,0%	485	0,66	535,44	0,02	0,56	0,079	0,662			
77,8%	490	0,66	533,80	0,02	0,56	0,079	0,661			
78,6%	495	0,66	532,17	0,02	0,56	0,080	0,659			
79,4%	500	0,67	530,55	0,02	0,56	0,080	0,657			
80,2%	505	0,67	528,94	0,02	0,55	0,080	0,655			
81,0%	510	0,67	527,35	0,02	0,55	0,080	0,653			
81,7%	515	0,67	525,76	0,02	0,55	0,081	0,652			
82,5%	520	0,67	524,18	0,02	0,55	0,081	0,650			
83,3%	525	0,68	522,62	0,02	0,55	0,081	0,648			
84,1%	530	0,68	521,07	0,02	0,54	0,081	0,646			
84,9%	535	0,68	519,52	0,02	0,54	0,082	0,645			
85,7%	540	0,68	517,99	0,02	0,54	0,082	0,643			
86,5%	545	0,68	516,46	0,02	0,54	0,082	0,641			
87,3%	550	0,69	514,95	0,02	0,53	0,082	0,639			
88,1%	555	0,69	513,45	0,02	0,53	0,083	0,638			
88,9%	560	0,69	511,96	0,02	0,53	0,083	0,636			
89,7%	565	0,69	510,47	0,02	0,53	0,083	0,634			
90,5%	570	0,69	509,00	0,02	0,53	0,083	0,632			
91,3%	575	0,70	507,54	0,02	0,52	0,084	0,631			
92,1%	580	0,70	506,09	0,02	0,52	0,084	0,629			
92,9%	585	0,70	504,65	0,02	0,52	0,084	0,627			
93,7%	590	0,70	503,21	0,02	0,52	0,084	0,625			
94,4%	595	0,70	501,79	0,02	0,52	0,085	0,624			
95,2%	600	0,71	500,38	0,02	0,51	0,085	0,622			
96,0%	605	0,71	498,97	0,02	0,51	0,085	0,620			
96,8%	610	0,71	497,58	0,02	0,51	0,085	0,618			
97,6%	615	0,71	496,19	0,02	0,51	0,085	0,617			
98,4%	620	0,71	494,82	0,02	0,51	0,086	0,615			
99,2%	625	0,72	493,45	0,02	0,50	0,086	0,613			
100,0%	630	0,72	492,09	0,02	0,50	0,086	0,611			
BOCA NORTE				4,71	15,06		19,774			
Dp Requerido (Pa)			4,09	7,07	25,23	15,06	18,04	28,37	97,87	
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,09
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	25,23
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	18,04
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	97,87
Total. Dp Ventiladores (Pa)	103,50

Posición de incendio	
410 m	65%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) **CORRECTO**

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	OFF	415,00	335	435	559,63	0,63	0	0,00
4	ON	515,00	435	535	525,76	0,67	2	21,43
								103,50

A.I.4 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 70% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 441 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT. INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot. incendio: 100MW								
441 m	70%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,1%	410	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,9%	415	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
66,7%	420	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
67,5%	425	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
68,3%	430	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,0%	435	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,8%	440	0,63	563,28	0,02		0,60		0,075	28,37	29,056
70,6%	445	0,63	561,45	0,02		0,59		0,076		0,689
71,4%	450	0,63	559,63	0,02		0,59		0,076		0,687
72,2%	455	0,63	557,83	0,02		0,59		0,076		0,686
73,0%	460	0,63	556,03	0,02		0,59		0,076		0,684
73,8%	465	0,64	554,25	0,02		0,59		0,077		0,682
74,6%	470	0,64	552,48	0,02		0,58		0,077		0,680
75,4%	475	0,64	550,73	0,02		0,58		0,077		0,678

76,2%	480	0,64	548,98	0,02							
77,0%	485	0,65	547,25	0,02							
77,8%	490	0,65	545,53	0,02							
78,6%	495	0,65	543,82	0,02							
79,4%	500	0,65	542,12	0,02							
80,2%	505	0,65	540,43	0,02							
81,0%	510	0,66	538,76	0,02							
81,7%	515	0,66	537,10	0,02							
82,5%	520	0,66	535,44	0,02							
83,3%	525	0,66	533,80	0,02							
84,1%	530	0,66	532,17	0,02							
84,9%	535	0,67	530,55	0,02							
85,7%	540	0,67	528,94	0,02							
86,5%	545	0,67	527,35	0,02							
87,3%	550	0,67	525,76	0,02							
88,1%	555	0,67	524,18	0,02							
88,9%	560	0,68	522,62	0,02							
89,7%	565	0,68	521,07	0,02							
90,5%	570	0,68	519,52	0,02							
91,3%	575	0,68	517,99	0,02							
92,1%	580	0,68	516,46	0,02							
92,9%	585	0,69	514,95	0,02							
93,7%	590	0,69	513,45	0,02							
94,4%	595	0,69	511,96	0,02							
95,2%	600	0,69	510,47	0,02							
96,0%	605	0,69	509,00	0,02							
96,8%	610	0,70	507,54	0,02							
97,6%	615	0,70	506,09	0,02							
98,4%	620	0,70	504,65	0,02							
99,2%	625	0,70	503,21	0,02							
100,0%	630	0,70	501,79	0,02							
BOCA NORTE					4,71		15,06				19,774
Dp Requerido (Pa)				4,21	7,07	21,68	15,06	18,68	28,37	95,06	
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)	

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,21
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	21,68
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	18,68
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	95,06
Total. Dp Ventiladores (Pa)	123,12

Posición de incendio	
441 m	70%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) CORRECTO

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	ON	415,00	335	435	293,00	1,20	2	41,04
4	OFF	515,00	435	535	537,10	0,66	0	0,00
								123,12

A.I.5 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 75% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 473 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT. INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot. incendio: 100MW								
473 m	75%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,1%	410	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,9%	415	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
66,7%	420	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
67,5%	425	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
68,3%	430	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,0%	435	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,8%	440	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
70,6%	445	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
71,4%	450	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
72,2%	455	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,0%	460	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,8%	465	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
74,6%	470	0,63	563,28	0,02		0,60		0,075	28,37	29,056
75,4%	475	0,63	561,45	0,02		0,59		0,076		0,689

76,2%	480	0,63	559,63	0,02						
77,0%	485	0,63	557,83	0,02						
77,8%	490	0,63	556,03	0,02						
78,6%	495	0,64	554,25	0,02						
79,4%	500	0,64	552,48	0,02						
80,2%	505	0,64	550,73	0,02						
81,0%	510	0,64	548,98	0,02						
81,7%	515	0,65	547,25	0,02						
82,5%	520	0,65	545,53	0,02						
83,3%	525	0,65	543,82	0,02						
84,1%	530	0,65	542,12	0,02						
84,9%	535	0,65	540,43	0,02						
85,7%	540	0,66	538,76	0,02						
86,5%	545	0,66	537,10	0,02						
87,3%	550	0,66	535,44	0,02						
88,1%	555	0,66	533,80	0,02						
88,9%	560	0,66	532,17	0,02						
89,7%	565	0,67	530,55	0,02						
90,5%	570	0,67	528,94	0,02						
91,3%	575	0,67	527,35	0,02						
92,1%	580	0,67	525,76	0,02						
92,9%	585	0,67	524,18	0,02						
93,7%	590	0,68	522,62	0,02						
94,4%	595	0,68	521,07	0,02						
95,2%	600	0,68	519,52	0,02						
96,0%	605	0,68	517,99	0,02						
96,8%	610	0,68	516,46	0,02						
97,6%	615	0,69	514,95	0,02						
98,4%	620	0,69	513,45	0,02						
99,2%	625	0,69	511,96	0,02						
100,0%	630	0,69	510,47	0,02						
BOCA NORTE					4,71		15,06			19,774
Dp Requerido (Pa)				4,30	7,07	18,55	15,06	19,24	28,37	92,58
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,30
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	18,55
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	19,24
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	92,58
Total. Dp Ventiladores (Pa)	123,12

Posición de incendio	
473 m	75%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) CORRECTO

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	ON	415,00	335	435	293,00	1,20	2	41,04
4	OFF	515,00	435	535	547,25	0,65	0	0,00
								123,12

A.I.6 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 80% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 504 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT.INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot.incendio: 100MW								
504 m	80%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,1%	410	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,9%	415	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
66,7%	420	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
67,5%	425	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
68,3%	430	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,0%	435	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,8%	440	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
70,6%	445	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
71,4%	450	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
72,2%	455	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,0%	460	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,8%	465	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
74,6%	470	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
75,4%	475	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216

76,2%	480	1,20	293,00	0,04						
77,0%	485	1,20	293,00	0,04						
77,8%	490	1,20	293,00	0,04						
78,6%	495	1,20	293,00	0,04						
79,4%	500	0,63	563,28	0,02						
80,2%	505	0,63	561,45	0,02						
81,0%	510	0,63	559,63	0,02						
81,7%	515	0,63	557,83	0,02						
82,5%	520	0,63	556,03	0,02						
83,3%	525	0,64	554,25	0,02						
84,1%	530	0,64	552,48	0,02						
84,9%	535	0,64	550,73	0,02						
85,7%	540	0,64	548,98	0,02						
86,5%	545	0,65	547,25	0,02						
87,3%	550	0,65	545,53	0,02						
88,1%	555	0,65	543,82	0,02						
88,9%	560	0,65	542,12	0,02						
89,7%	565	0,65	540,43	0,02						
90,5%	570	0,66	538,76	0,02						
91,3%	575	0,66	537,10	0,02						
92,1%	580	0,66	535,44	0,02						
92,9%	585	0,66	533,80	0,02						
93,7%	590	0,66	532,17	0,02						
94,4%	595	0,67	530,55	0,02						
95,2%	600	0,67	528,94	0,02						
96,0%	605	0,67	527,35	0,02						
96,8%	610	0,67	525,76	0,02						
97,6%	615	0,67	524,18	0,02						
98,4%	620	0,68	522,62	0,02						
99,2%	625	0,68	521,07	0,02						
100,0%	630	0,68	519,52	0,02						
BOCA NORTE					4,71		15,06			19,774
Dp Requerido (Pa)				4,40	7,07	15,34	15,06	19,81	28,37	90,05
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,40
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	15,34
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	19,81
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	90,05
Total. Dp Ventiladores (Pa)	123,12

Posición de incendio	
504 m	80%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) **CORRECTO**

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	ON	415,00	335	435	293,00	1,20	2	41,04
4	OFF	515,00	435	535	557,83	0,63	0	0,00
								123,12

A.I.7 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 85% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 536 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT.INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot.incendio: 100MW								
536 m	85%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,1%	410	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,9%	415	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
66,7%	420	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
67,5%	425	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
68,3%	430	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,0%	435	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,8%	440	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
70,6%	445	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
71,4%	450	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
72,2%	455	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,0%	460	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,8%	465	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
74,6%	470	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
75,4%	475	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216

76,2%	480	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
77,0%	485	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
77,8%	490	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
78,6%	495	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
79,4%	500	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
80,2%	505	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
81,0%	510	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
81,7%	515	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
82,5%	520	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
83,3%	525	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
84,1%	530	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
84,9%	535	0,63	563,28	0,02	0,60	0,075	28,37	29,056		
85,7%	540	0,63	561,45	0,02	0,59	0,076	0,689			
86,5%	545	0,63	559,63	0,02	0,59	0,076	0,687			
87,3%	550	0,63	557,83	0,02	0,59	0,076	0,686			
88,1%	555	0,63	556,03	0,02	0,59	0,076	0,684			
88,9%	560	0,64	554,25	0,02	0,59	0,077	0,682			
89,7%	565	0,64	552,48	0,02	0,58	0,077	0,680			
90,5%	570	0,64	550,73	0,02	0,58	0,077	0,678			
91,3%	575	0,64	548,98	0,02	0,58	0,077	0,677			
92,1%	580	0,65	547,25	0,02	0,58	0,077	0,675			
92,9%	585	0,65	545,53	0,02	0,57	0,078	0,673			
93,7%	590	0,65	543,82	0,02	0,57	0,078	0,671			
94,4%	595	0,65	542,12	0,02	0,57	0,078	0,670			
95,2%	600	0,65	540,43	0,02	0,57	0,078	0,668			
96,0%	605	0,66	538,76	0,02	0,57	0,079	0,666			
96,8%	610	0,66	537,10	0,02	0,56	0,079	0,664			
97,6%	615	0,66	535,44	0,02	0,56	0,079	0,662			
98,4%	620	0,66	533,80	0,02	0,56	0,079	0,661			
99,2%	625	0,66	532,17	0,02	0,56	0,080	0,659			
100,0%	630	0,67	530,55	0,02	0,56	0,080	0,657			
BOCA NORTE				4,71	15,06		19,774			
Dp Requerido (Pa)				4,52	7,07	11,51	15,06	20,48	28,37	87,01
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,52
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	11,51
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	20,48
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	87,01
Total. Dp Ventiladores (Pa)	164,15

Posición de incendio	
536 m	85%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) **CORRECTO**

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	ON	415,00	335	435	293,00	1,20	2	41,04
4	ON	515,00	435	535	293,00	1,20	2	41,04
								164,15

A.I.8 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 90% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 567 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT.INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot.incendio: 100MW								
567 m	90%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,1%	410	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,9%	415	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
66,7%	420	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
67,5%	425	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
68,3%	430	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,0%	435	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,8%	440	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
70,6%	445	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
71,4%	450	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
72,2%	455	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,0%	460	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,8%	465	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
74,6%	470	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
75,4%	475	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216

76,2%	480	1,20	293,00	0,04							
77,0%	485	1,20	293,00	0,04							
77,8%	490	1,20	293,00	0,04							
78,6%	495	1,20	293,00	0,04							
79,4%	500	1,20	293,00	0,04							
80,2%	505	1,20	293,00	0,04							
81,0%	510	1,20	293,00	0,04							
81,7%	515	1,20	293,00	0,04							
82,5%	520	1,20	293,00	0,04							
83,3%	525	1,20	293,00	0,04							
84,1%	530	1,20	293,00	0,04							
84,9%	535	1,20	293,00	0,04							
85,7%	540	1,20	293,00	0,04							
86,5%	545	1,20	293,00	0,04							
87,3%	550	1,20	293,00	0,04							
88,1%	555	1,20	293,00	0,04							
88,9%	560	1,20	293,00	0,04							
89,7%	565	0,63	563,28	0,02							
90,5%	570	0,63	561,45	0,02							
91,3%	575	0,63	559,63	0,02							
92,1%	580	0,63	557,83	0,02							
92,9%	585	0,63	556,03	0,02							
93,7%	590	0,64	554,25	0,02							
94,4%	595	0,64	552,48	0,02							
95,2%	600	0,64	550,73	0,02							
96,0%	605	0,64	548,98	0,02							
96,8%	610	0,65	547,25	0,02							
97,6%	615	0,65	545,53	0,02							
98,4%	620	0,65	543,82	0,02							
99,2%	625	0,65	542,12	0,02							
100,0%	630	0,65	540,43	0,02							
BOCA NORTE					4,71		15,06				19,774
Dp Requerido (Pa)				4,63	7,07	8,15	15,06	21,06	28,37	84,33	
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)	

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,63
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	8,15
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	21,06
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	84,33
Total. Dp Ventiladores (Pa)	164,15

Posición de incendio	
567 m	90%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) **CORRECTO**

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	ON	415,00	335	435	293,00	1,20	2	41,04
4	ON	515,00	435	535	293,00	1,20	2	41,04
								164,15

A.I.9 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 95% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 599 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT.INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot.incendio: 100MW								
599 m	95%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,1%	410	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,9%	415	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
66,7%	420	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
67,5%	425	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
68,3%	430	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,0%	435	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,8%	440	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
70,6%	445	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
71,4%	450	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
72,2%	455	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,0%	460	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,8%	465	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
74,6%	470	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
75,4%	475	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216

76,2%	480	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
77,0%	485	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
77,8%	490	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
78,6%	495	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
79,4%	500	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
80,2%	505	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
81,0%	510	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
81,7%	515	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
82,5%	520	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
83,3%	525	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
84,1%	530	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
84,9%	535	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
85,7%	540	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
86,5%	545	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
87,3%	550	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
88,1%	555	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
88,9%	560	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
89,7%	565	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
90,5%	570	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
91,3%	575	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
92,1%	580	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
92,9%	585	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
93,7%	590	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
94,4%	595	0,63	563,28	0,02	0,60	0,075	28,37	29,056		
95,2%	600	0,63	561,45	0,02	0,59	0,076	0,689			
96,0%	605	0,63	559,63	0,02	0,59	0,076	0,687			
96,8%	610	0,63	557,83	0,02	0,59	0,076	0,686			
97,6%	615	0,63	556,03	0,02	0,59	0,076	0,684			
98,4%	620	0,64	554,25	0,02	0,59	0,077	0,682			
99,2%	625	0,64	552,48	0,02	0,58	0,077	0,680			
100,0%	630	0,64	550,73	0,02	0,58	0,077	0,678			
BOCA NORTE				4,71	15,06		19,774			
Dp Requerido (Pa)			4,74	7,07	4,71	15,06	21,66	28,37	81,59	
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,74
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	4,71
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	21,66
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	81,59
Total. Dp Ventiladores (Pa)	164,15

Posición de incendio	
599 m	95%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) **CORRECTO**

Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	ON	415,00	335	435	293,00	1,20	2	41,04
4	ON	515,00	435	535	293,00	1,20	2	41,04
								164,15

A.I.10 HOJA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA: POSICIÓN DE INCENDIO: 100% DE LA LONGITUD DEL TÚNEL (A 630 m DE LA BOCA DE ENTRADA). POT.INCENDIO: 100 MW.

Posición de incendio		Hoja de cálculo de pérdidas de carga. Pot.incendio: 100MW								
630 m	100%									
% Túnel	Longitud (m)	ρ aire interior (kg/m ³)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp Singulares (Pa)	Dp Chim. (Pa)	Dp Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)
BOCA SUR					2,36					2,356
0	0	1,20	293,00	0		0,00		0,177		0,177
0,8%	5	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
1,6%	10	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
2,4%	15	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
3,2%	20	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,0%	25	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
4,8%	30	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
5,6%	35	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
6,3%	40	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,1%	45	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
7,9%	50	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
8,7%	55	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
9,5%	60	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
10,3%	65	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,1%	70	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
11,9%	75	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
12,7%	80	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
13,5%	85	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
14,3%	90	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,1%	95	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
15,9%	100	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
16,7%	105	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
17,5%	110	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
18,3%	115	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,0%	120	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
19,8%	125	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
20,6%	130	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
21,4%	135	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
22,2%	140	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,0%	145	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
23,8%	150	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
24,6%	155	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
25,4%	160	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
26,2%	165	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,0%	170	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
27,8%	175	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
28,6%	180	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
29,4%	185	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
30,2%	190	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,0%	195	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
31,7%	200	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
32,5%	205	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
33,3%	210	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,1%	215	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
34,9%	220	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
35,7%	225	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
36,5%	230	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
37,3%	235	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,1%	240	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
38,9%	245	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
39,7%	250	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
40,5%	255	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
41,3%	260	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,1%	265	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
42,9%	270	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
43,7%	275	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
44,4%	280	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
45,2%	285	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,0%	290	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
46,8%	295	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
47,6%	300	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
48,4%	305	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
49,2%	310	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,0%	315	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
50,8%	320	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
51,6%	325	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
52,4%	330	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
53,2%	335	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,0%	340	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
54,8%	345	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
55,6%	350	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
56,3%	355	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,1%	360	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
57,9%	365	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
58,7%	370	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
59,5%	375	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
60,3%	380	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,1%	385	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
61,9%	390	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
62,7%	395	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
63,5%	400	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
64,3%	405	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,1%	410	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
65,9%	415	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
66,7%	420	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
67,5%	425	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
68,3%	430	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,0%	435	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
69,8%	440	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
70,6%	445	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
71,4%	450	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
72,2%	455	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,0%	460	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
73,8%	465	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
74,6%	470	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216
75,4%	475	1,20	293,00	0,04		0,00		0,177		0,216

76,2%	480	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
77,0%	485	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
77,8%	490	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
78,6%	495	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
79,4%	500	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
80,2%	505	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
81,0%	510	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
81,7%	515	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
82,5%	520	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
83,3%	525	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
84,1%	530	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
84,9%	535	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
85,7%	540	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
86,5%	545	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
87,3%	550	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
88,1%	555	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
88,9%	560	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
89,7%	565	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
90,5%	570	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
91,3%	575	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
92,1%	580	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
92,9%	585	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
93,7%	590	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
94,4%	595	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
95,2%	600	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
96,0%	605	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
96,8%	610	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
97,6%	615	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
98,4%	620	1,20	293,00	0,04	0,00	0,177	0,216			
99,2%	625	1,20	293,00	0,04	0,00	0,145	0,183			
100,0%	630	0,63	563,28	0,02	0,60	0,075	28,37	29,056		
BOCA NORTE					4,71	15,06		19,774		
Dp Requerido (Pa)				4,86	7,07	0,60	15,06	22,33	28,37	78,28
% Túnel	Longitud (m)	p aire interior (kg/m3)	T(K)	Dp Fricción (Pa)	Dp.sing. (Pa)	DP Chim. (Pa)	Dp. Vient ext. (Pa)	Dp veh. (Pa)	Dp. Bloq. Inc. (Pa)	Dp Requerido (Pa)

Sumatorio Pérdida de carga	
Dp Fricción (Pa)	4,86
Dp.sing. (Pa)	7,07
DP Chim. (Pa)	0,60
Dp. Vient ext. (Pa)	15,06
Dp veh. (Pa)	22,33
Dp. Bloq. Inc. (Pa)	28,37
Total. Dp Requerido (Pa)	78,28
Total. Dp Ventiladores (Pa)	164,15

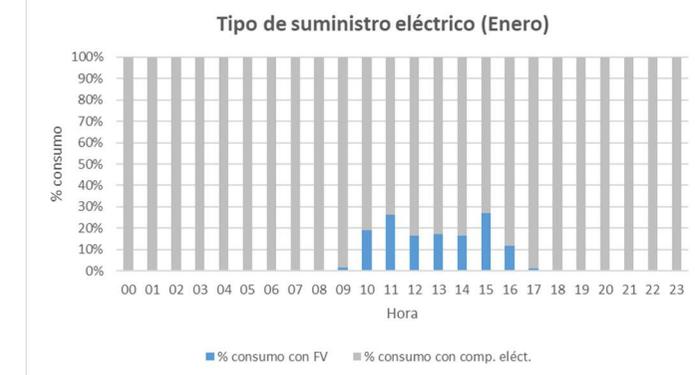
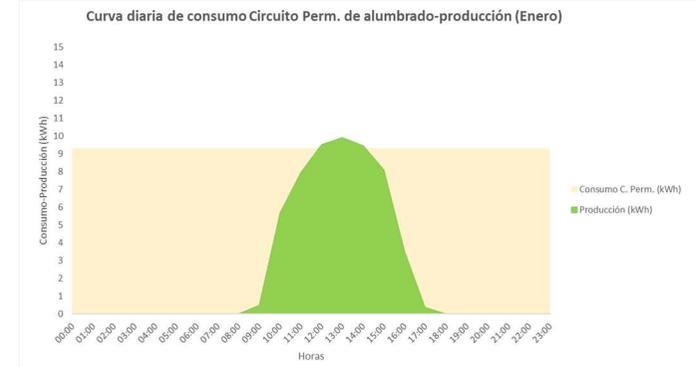
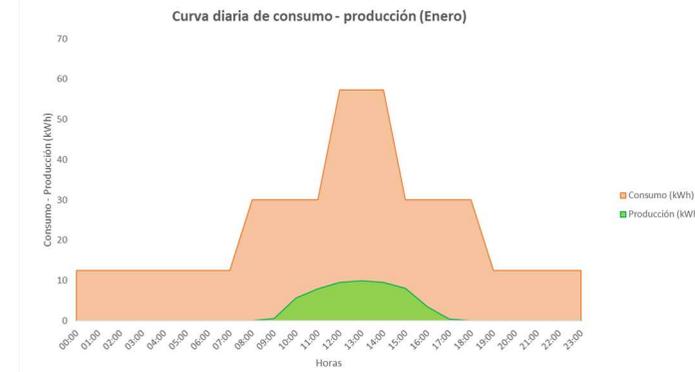
Posición de incendio	
630 m	100%

Dimensionado (Dp.Vent>Dp. Requerido) **CORRECTO**

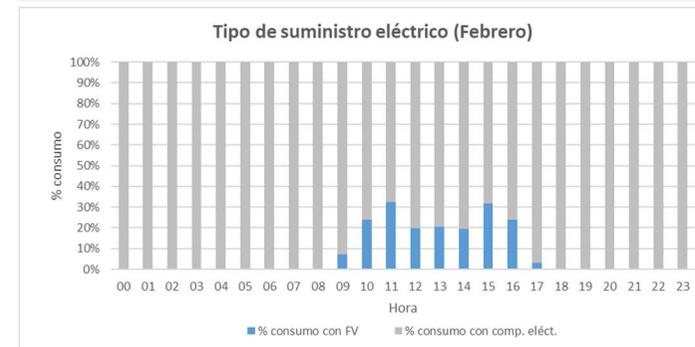
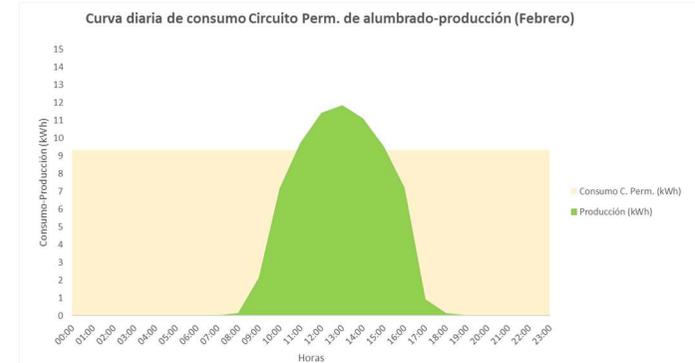
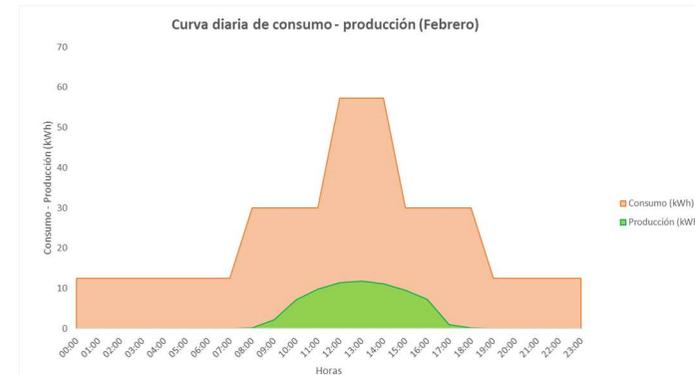
Pareja de ventiladores	Funcionamiento Ventilador	Distancia a la boca de entrada (m)	Posición de incendio donde no arrancar ventilador (m)		Temperatura (K)	Densidad (kg/m3)	Nº Ventiladores	Dp. Ventilad. (Pa)
			Límite min.	Límite max.				
1	ON	115,00	35	135	293,00	1,20	2	41,04
2	ON	215,00	135	235	293,00	1,20	2	41,04
3	ON	415,00	335	435	293,00	1,20	2	41,04
4	ON	515,00	435	535	293,00	1,20	2	41,04
								164,15

ANEXO II. ESTUDIO ENERGÉTICO

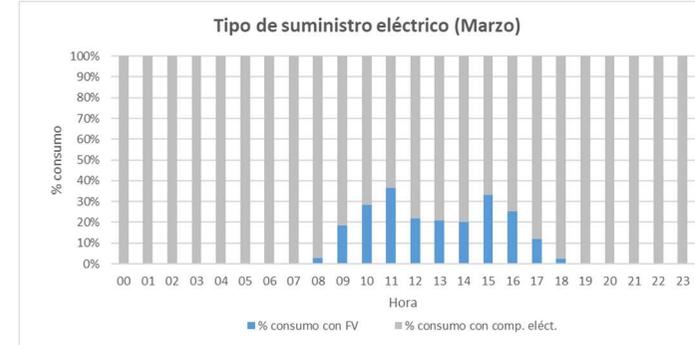
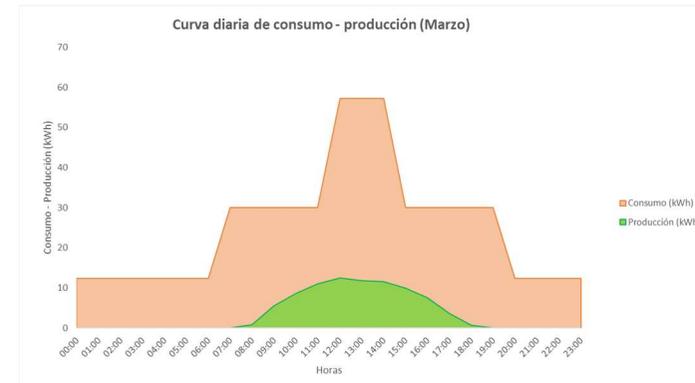
Mes/Hora	Enero				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
09:00	0,49	30,015	9,3	1,65%	98,35%
10:00	5,68	30,015	9,3	18,93%	81,07%
11:00	7,95	30,015	9,3	26,47%	73,53%
12:00	9,51	57,27	9,3	16,61%	83,39%
13:00	9,91	57,27	9,3	17,31%	82,69%
14:00	9,47	57,27	9,3	16,53%	83,47%
15:00	8,09	30,015	9,3	26,96%	73,04%
16:00	3,49	30,015	9,3	11,64%	88,36%
17:00	0,38	30,015	9,3	1,26%	98,74%
18:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
19:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
20:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



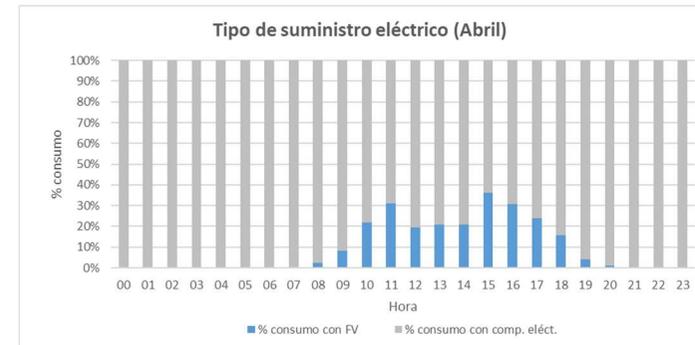
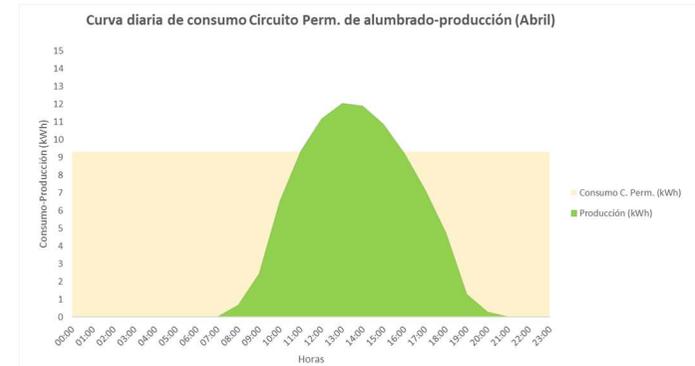
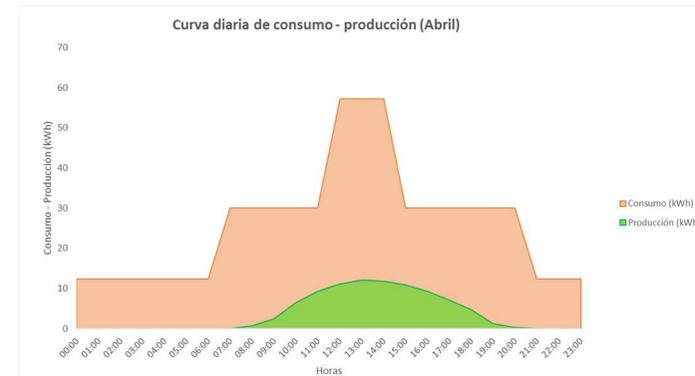
Mes/Hora	Febrero				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,12	30,015	9,3	0,38%	99,62%
09:00	2,11	30,015	9,3	7,03%	92,97%
10:00	7,16	30,015	9,3	23,86%	76,14%
11:00	9,72	30,015	9,3	32,40%	67,60%
12:00	11,40	57,27	9,3	19,90%	80,10%
13:00	11,81	57,27	9,3	20,63%	79,37%
14:00	11,10	57,27	9,3	19,39%	80,61%
15:00	9,51	30,015	9,3	31,70%	68,30%
16:00	7,17	30,015	9,3	23,89%	76,11%
17:00	0,90	30,015	9,3	3,00%	97,00%
18:00	0,14	30,015	9,3	0,46%	99,54%
19:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
20:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



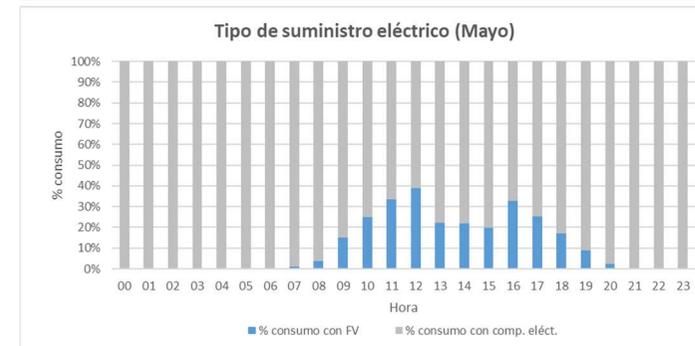
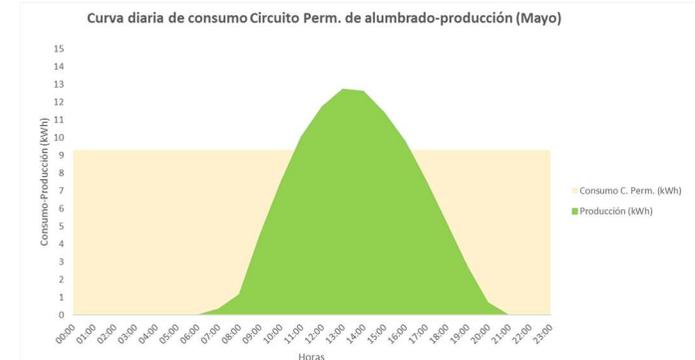
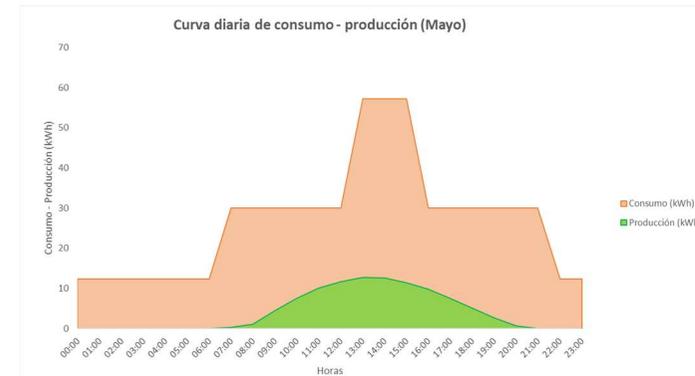
Mes/Hora	Marzo				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,05	30,015	9,3	0,17%	99,83%
08:00	0,80	30,015	9,3	2,67%	97,33%
09:00	5,49	30,015	9,3	18,30%	81,70%
10:00	8,56	30,015	9,3	28,52%	71,48%
11:00	10,99	30,015	9,3	36,61%	63,39%
12:00	12,43	57,27	9,3	21,71%	78,29%
13:00	11,88	57,27	9,3	20,75%	79,25%
14:00	11,58	57,27	9,3	20,23%	79,77%
15:00	9,97	30,015	9,3	33,22%	66,78%
16:00	7,60	30,015	9,3	25,32%	74,68%
17:00	3,60	30,015	9,3	11,98%	88,02%
18:00	0,71	30,015	9,3	2,37%	97,63%
19:00	0,00	30,015	9,3	0,01%	99,99%
20:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



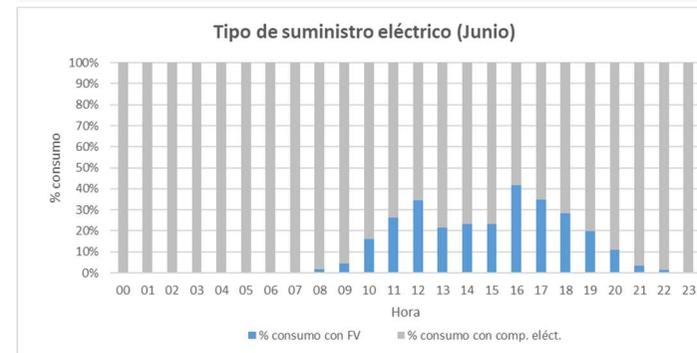
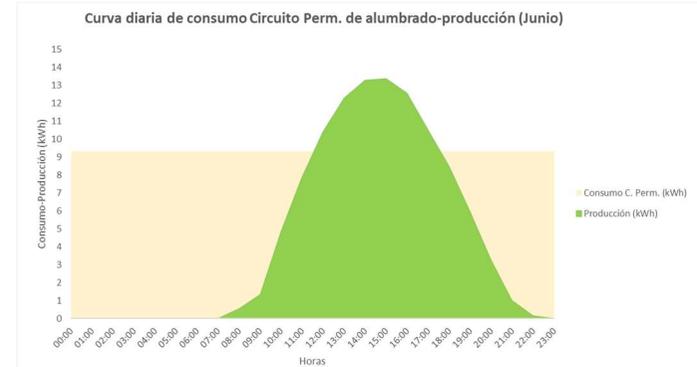
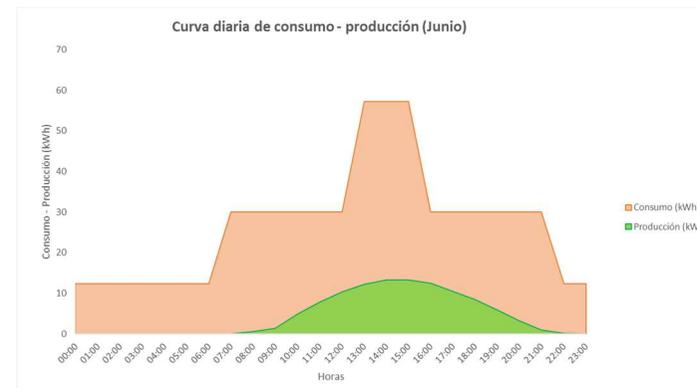
Mes/Hora	Abril				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,68	30,015	9,3	2,25%	97,75%
09:00	2,42	30,015	9,3	8,06%	91,94%
10:00	6,52	30,015	9,3	21,73%	78,27%
11:00	9,32	30,015	9,3	31,06%	68,94%
12:00	11,15	57,27	9,3	19,47%	80,53%
13:00	12,03	57,27	9,3	21,00%	79,00%
14:00	11,87	57,27	9,3	20,72%	79,28%
15:00	10,84	30,015	9,3	36,10%	63,90%
16:00	9,23	30,015	9,3	30,74%	69,26%
17:00	7,14	30,015	9,3	23,79%	76,21%
18:00	4,73	30,015	9,3	15,75%	84,25%
19:00	1,27	30,015	9,3	4,23%	95,77%
20:00	0,27	30,015	9,3	0,90%	99,10%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



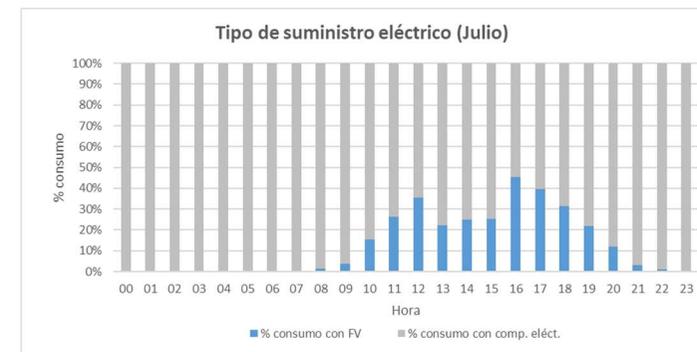
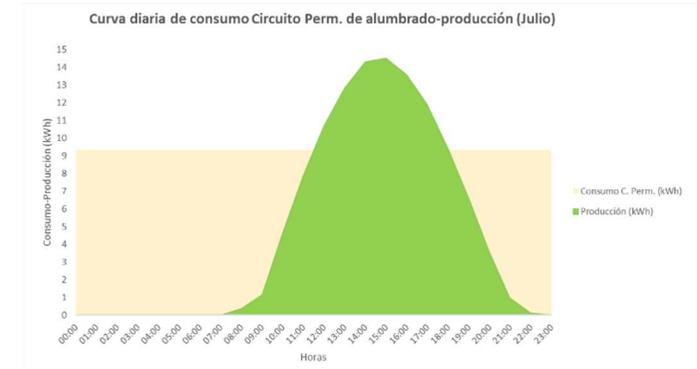
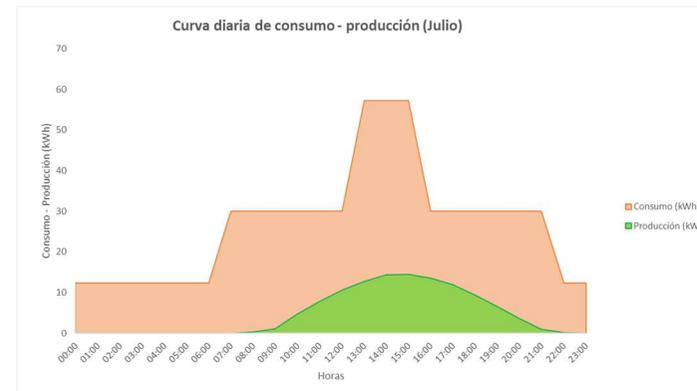
Mes/Hora	Mayo				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,33	30,015	9,3	1,09%	98,91%
08:00	1,16	30,015	9,3	3,85%	96,15%
09:00	4,51	30,015	9,3	15,03%	84,97%
10:00	7,48	30,015	9,3	24,91%	75,09%
11:00	10,05	30,015	9,3	33,47%	66,53%
12:00	11,72	30,015	9,3	39,06%	60,94%
13:00	12,71	57,27	9,3	22,20%	77,80%
14:00	12,62	57,27	9,3	22,04%	77,96%
15:00	11,38	57,27	9,3	19,87%	80,13%
16:00	9,79	30,015	9,3	32,62%	67,38%
17:00	7,57	30,015	9,3	25,22%	74,78%
18:00	5,17	30,015	9,3	17,21%	82,79%
19:00	2,70	30,015	9,3	8,99%	91,01%
20:00	0,70	30,015	9,3	2,35%	97,65%
21:00	0,01	30,015	9,3	0,02%	99,98%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



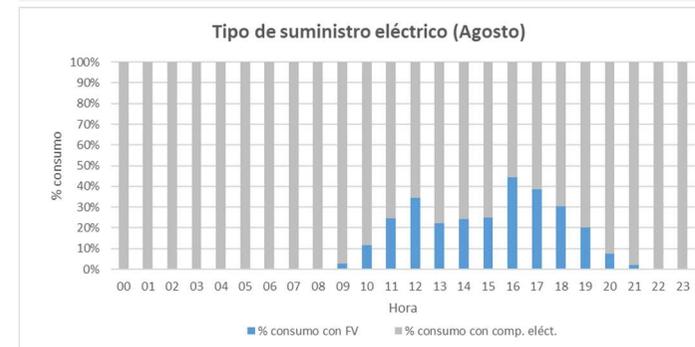
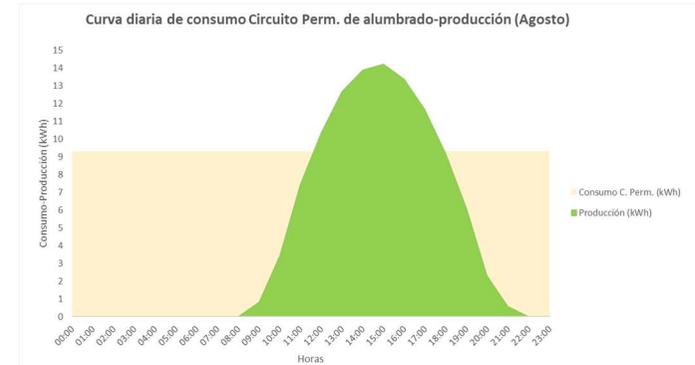
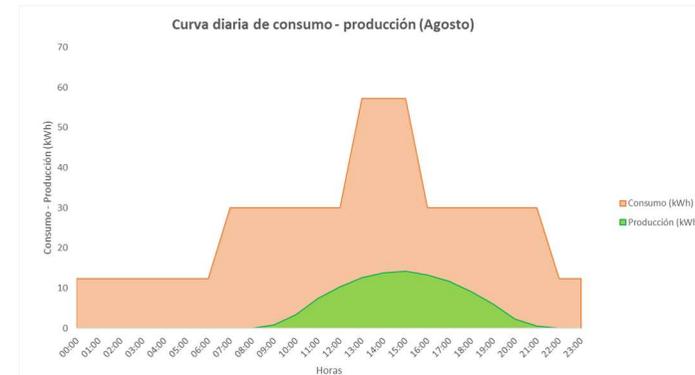
Mes/Hora	Junio				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,55	30,015	9,3	1,84%	98,16%
09:00	1,33	30,015	9,3	4,43%	95,57%
10:00	4,87	30,015	9,3	16,23%	83,77%
11:00	7,84	30,015	9,3	26,14%	73,86%
12:00	10,40	30,015	9,3	34,64%	65,36%
13:00	12,28	57,27	9,3	21,44%	78,56%
14:00	13,28	57,27	9,3	23,19%	76,81%
15:00	13,36	57,27	9,3	23,32%	76,68%
16:00	12,53	30,015	9,3	41,76%	58,24%
17:00	10,50	30,015	9,3	34,99%	65,01%
18:00	8,46	30,015	9,3	28,19%	71,81%
19:00	5,90	30,015	9,3	19,67%	80,33%
20:00	3,28	30,015	9,3	10,94%	89,06%
21:00	1,00	30,015	9,3	3,32%	96,68%
22:00	0,15	12,42	9,3	1,25%	98,75%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



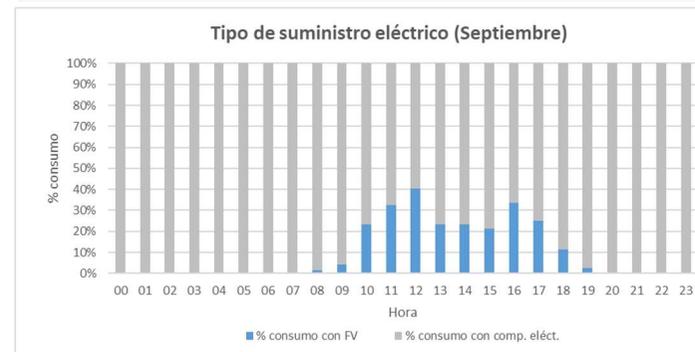
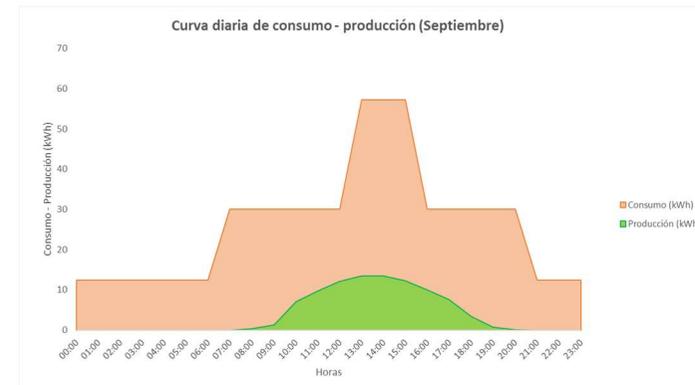
Mes/Hora	Julio				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,37	30,015	9,3	1,24%	98,76%
09:00	1,16	30,015	9,3	3,88%	96,12%
10:00	4,67	30,015	9,3	15,55%	84,45%
11:00	7,85	30,015	9,3	26,16%	73,84%
12:00	10,66	30,015	9,3	35,52%	64,48%
13:00	12,81	57,27	9,3	22,36%	77,64%
14:00	14,31	57,27	9,3	24,99%	75,01%
15:00	14,50	57,27	9,3	25,32%	74,68%
16:00	13,59	30,015	9,3	45,26%	54,74%
17:00	11,89	30,015	9,3	39,63%	60,37%
18:00	9,39	30,015	9,3	31,29%	68,71%
19:00	6,56	30,015	9,3	21,87%	78,13%
20:00	3,62	30,015	9,3	12,06%	87,94%
21:00	0,97	30,015	9,3	3,22%	96,78%
22:00	0,13	12,42	9,3	1,02%	98,98%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



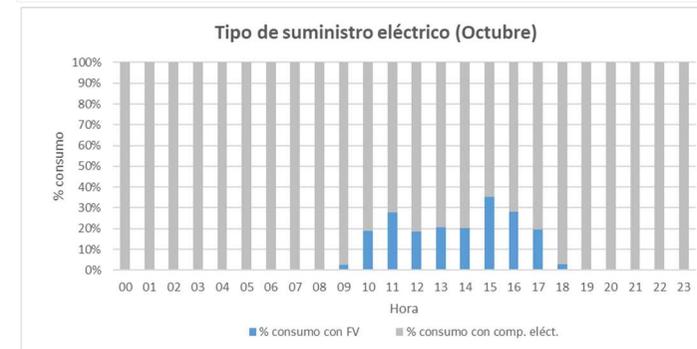
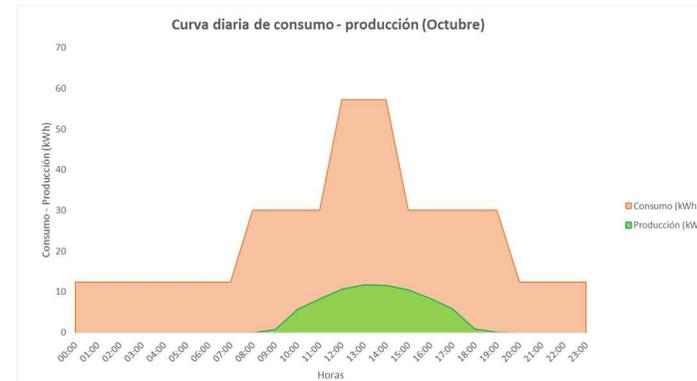
Mes/Hora	Agosto				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,02	30,015	9,3	0,06%	99,94%
09:00	0,82	30,015	9,3	2,73%	97,27%
10:00	3,45	30,015	9,3	11,48%	88,52%
11:00	7,43	30,015	9,3	24,74%	75,26%
12:00	10,34	30,015	9,3	34,45%	65,55%
13:00	12,66	57,27	9,3	22,11%	77,89%
14:00	13,87	57,27	9,3	24,21%	75,79%
15:00	14,21	57,27	9,3	24,82%	75,18%
16:00	13,35	30,015	9,3	44,49%	55,51%
17:00	11,63	30,015	9,3	38,74%	61,26%
18:00	9,16	30,015	9,3	30,53%	69,47%
19:00	6,05	30,015	9,3	20,15%	79,85%
20:00	2,31	30,015	9,3	7,69%	92,31%
21:00	0,57	30,015	9,3	1,91%	98,09%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,01%	99,99%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



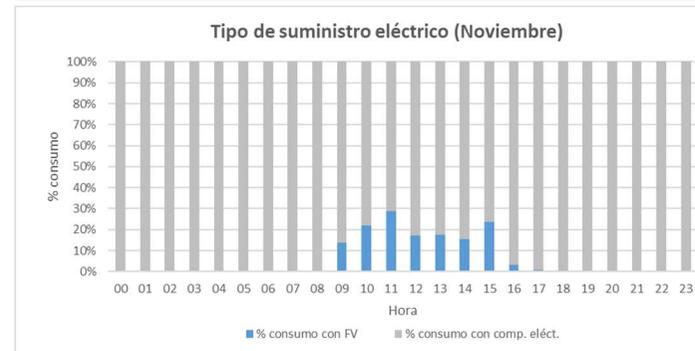
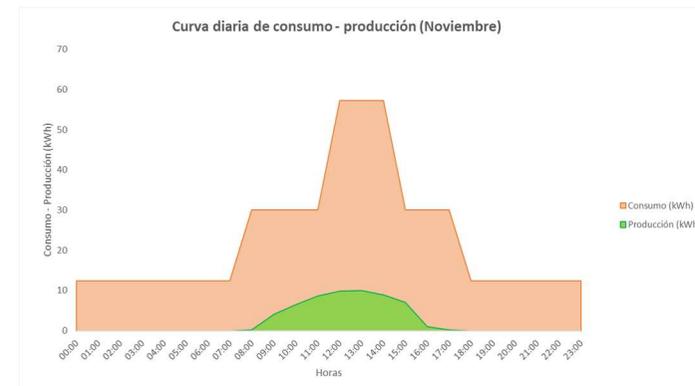
Mes/Hora	Septiembre				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,41	30,015	9,3	1,35%	98,65%
09:00	1,23	30,015	9,3	4,09%	95,91%
10:00	6,98	30,015	9,3	23,25%	76,75%
11:00	9,75	30,015	9,3	32,49%	67,51%
12:00	12,17	30,015	9,3	40,54%	59,46%
13:00	13,46	57,27	9,3	23,50%	76,50%
14:00	13,41	57,27	9,3	23,41%	76,59%
15:00	12,27	57,27	9,3	21,43%	78,57%
16:00	10,03	30,015	9,3	33,43%	66,57%
17:00	7,51	30,015	9,3	25,04%	74,96%
18:00	3,43	30,015	9,3	11,44%	88,56%
19:00	0,78	30,015	9,3	2,61%	97,39%
20:00	0,03	30,015	9,3	0,09%	99,91%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



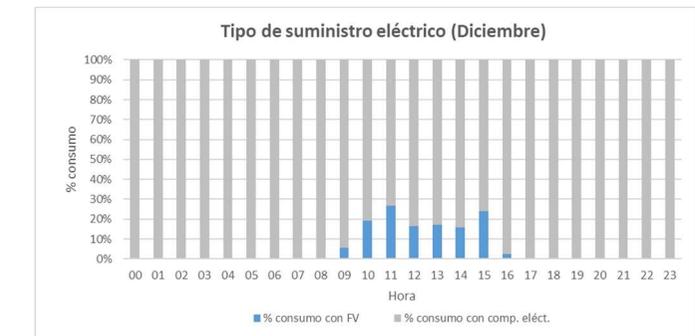
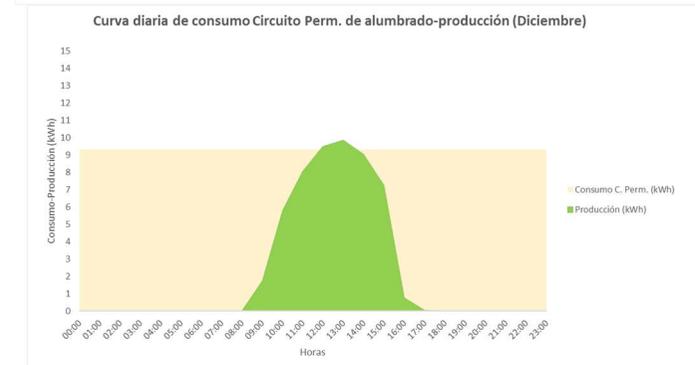
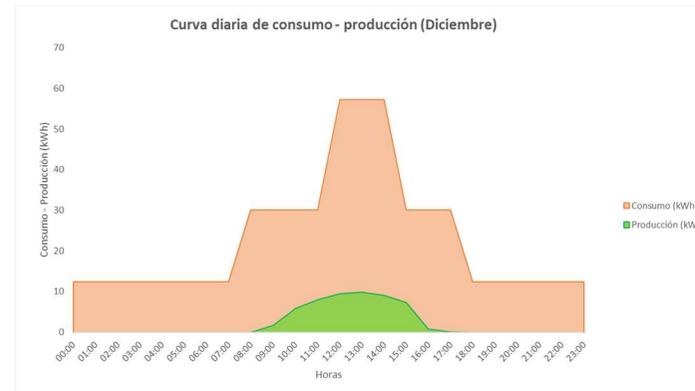
Mes/Hora	Octubre				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,01	30,015	9,3	0,03%	99,97%
09:00	0,76	30,015	9,3	2,55%	97,45%
10:00	5,68	30,015	9,3	18,91%	81,09%
11:00	8,31	30,015	9,3	27,68%	72,32%
12:00	10,60	57,27	9,3	18,51%	81,49%
13:00	11,74	57,27	9,3	20,49%	79,51%
14:00	11,66	57,27	9,3	20,36%	79,64%
15:00	10,59	30,015	9,3	35,28%	64,72%
16:00	8,45	30,015	9,3	28,15%	71,85%
17:00	5,84	30,015	9,3	19,46%	80,54%
18:00	0,84	30,015	9,3	2,79%	97,21%
19:00	0,07	30,015	9,3	0,23%	99,77%
20:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



Mes/Hora	Noviembre				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,18	30,015	9,3	0,60%	99,40%
09:00	4,15	30,015	9,3	13,82%	86,18%
10:00	6,55	30,015	9,3	21,83%	78,17%
11:00	8,65	30,015	9,3	28,81%	71,19%
12:00	9,85	57,27	9,3	17,20%	82,80%
13:00	9,97	57,27	9,3	17,41%	82,59%
14:00	8,93	57,27	9,3	15,58%	84,42%
15:00	7,08	30,015	9,3	23,59%	76,41%
16:00	0,96	30,015	9,3	3,21%	96,79%
17:00	0,24	30,015	9,3	0,80%	99,20%
18:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
19:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
20:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



Mes/Hora	Diciembre				
	Producción (kWh)	Consumo (kWh)	Consumo C. Perm. (kWh)	% consumo con FV	% consumo con comp. eléct.
00:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
01:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
02:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
03:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
04:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
05:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
06:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
07:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
08:00	0,00	30,015	9,3	0,00%	100,00%
09:00	1,72	30,015	9,3	5,73%	94,27%
10:00	5,78	30,015	9,3	19,27%	80,73%
11:00	8,02	30,015	9,3	26,72%	73,28%
12:00	9,47	57,27	9,3	16,54%	83,46%
13:00	9,84	57,27	9,3	17,18%	82,82%
14:00	9,03	57,27	9,3	15,77%	84,23%
15:00	7,25	30,015	9,3	24,15%	75,85%
16:00	0,75	30,015	9,3	2,49%	97,51%
17:00	0,04	30,015	9,3	0,13%	99,87%
18:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
19:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
20:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
21:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
22:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%
23:00	0,00	12,42	9,3	0,00%	100,00%



ANEXO III. RESULTADOS PVGIS



PVGIS-5 valores estimados de la producción eléctrica solar:

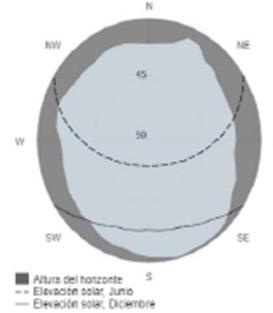
Datos proporcionados:

Latitud/Longitud: 42.287,0.936
 Horizonte: Calculado
 Base de datos: PVGIS-SARAH2
 Tecnología FV: Silicio cristalino
 FV instalado: 17.68 kWp
 Pérdidas sistema: 5 %

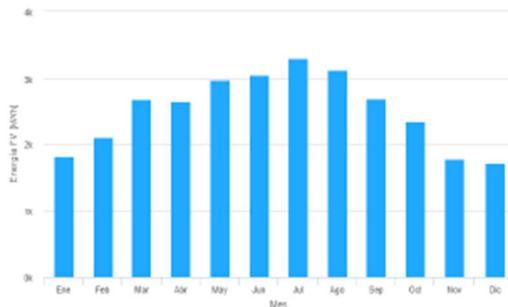
Resultados de la simulación

Ángulo de inclinación: 30 °
 Ángulo de azimut: 0 °
 Producción anual FV: 30207.45 kWh
 Irradiación anual: 1975.14 kWh/m²
 Variación interanual: 993.09 kWh
 Cambios en la producción debido a:
 Ángulo de incidencia: -2.21 %
 Efectos espectrales: 0.7 %
 Temperatura y baja irradiancia: -7.54 %
 Pérdidas totales: -13.5 %

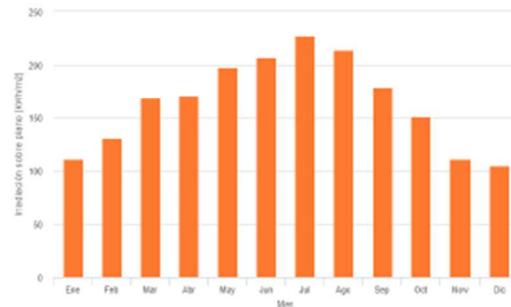
Perfil del horizonte en la localización seleccionad



Producción de energía mensual del sistema FV fijo:



Irradiación mensual sobre plano fijo:



Energía FV y radiación solar mensual

Mes	E _m	H(i) _m	SD _m
Enero	1819.5	111.3	266.1
Febrero	2098.3	130.1	275.1
Marzo	2669.6	169.4	215.1
Abril	2633.8	171.3	279.4
Mayo	2987.4	198.1	264.1
Junio	3054.0	207.1	102.9
Julio	3307.4	227.7	112.5
Agosto	3131.4	214.3	100.0
Septiembre	2677.5	179.2	113.0
Octubre	2332.0	150.9	189.3
Noviembre	1778.3	110.8	219.9
Diciembre	1718.4	105.1	210.5

E_m: Producción eléctrica media mensual del sistema definido [kWh].

H(i)_m: Suma media mensual de la irradiación global recibida por metro cuadrado por los módulos del sistema dado [kWh/m²].

SD_m: Desviación estándar de la producción eléctrica mensual debida a la variación interanual [kWh].

ANEXO IV. RESULTADOS HELIOSCOPE

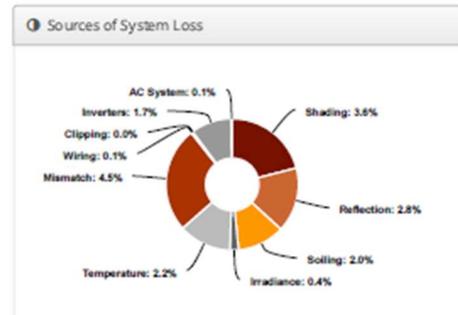
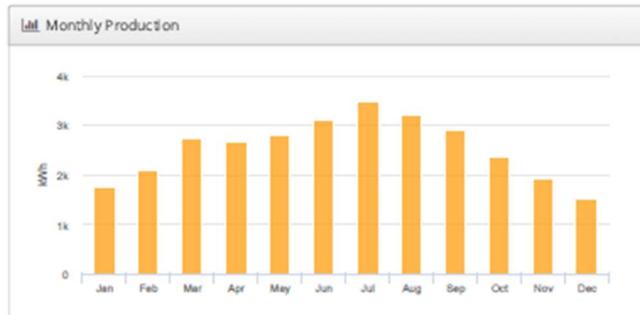
Design 1 Túnel de Erinyà, Túnel de Erinyà (boca sur)

Report	
Project Name	Túnel de Erinyà
Project Description	TFM
Project Address	Túnel de Erinyà (boca sur)
Prepared By	PABLO VILLAESCUSA pablovi294@gmail.com



universidad
de león

System Metrics	
Design	Design 1
Module DC Nameplate	17.7 kW
Inverter AC Nameplate	170 kW Load Ratio: 1.04
Annual Production	30.62 MWh
Performance Ratio	83.9%
kWh/kWp	1,732.5
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, meteororm (meteororm)
Simulator Version	6827cc4bc4-fc820529a-cddb18cb01-e6a648b615



Annual Production			
	Description	Output	% Delta
Irradiance (kWh/m ²)	Annual Global Horizontal Irradiance	1,703.1	
	POA Irradiance	2,064.0	21.2%
	Shaded Irradiance	1,989.1	-3.6%
	Irradiance after Reflection	1,934.2	-2.8%
	Irradiance after Soiling	1,895.5	-2.0%
	Total Collector Irradiance	1,896.2	0.0%
Energy (kWh)	Nameplate	33,524.9	
	Output at Irradiance Levels	33,405.5	-0.4%
	Output at Cell Temperature Derate	32,658.9	-2.2%
	Output After Mismatch	31,192.9	-4.5%
	Optimal DC Output	31,172.4	-0.1%
	Constrained DC Output	31,167.0	0.0%
	Inverter Output	30,637.1	-1.7%
	Energy to Grid	30,621.5	-0.1%
Temperature Metrics			
	Avg. Operating Ambient Temp	12.6°C	
	Avg. Operating Cell Temp	23.0°C	
Simulation Metrics			
	Operating Hours	4649	
	Solved Hours	4649	

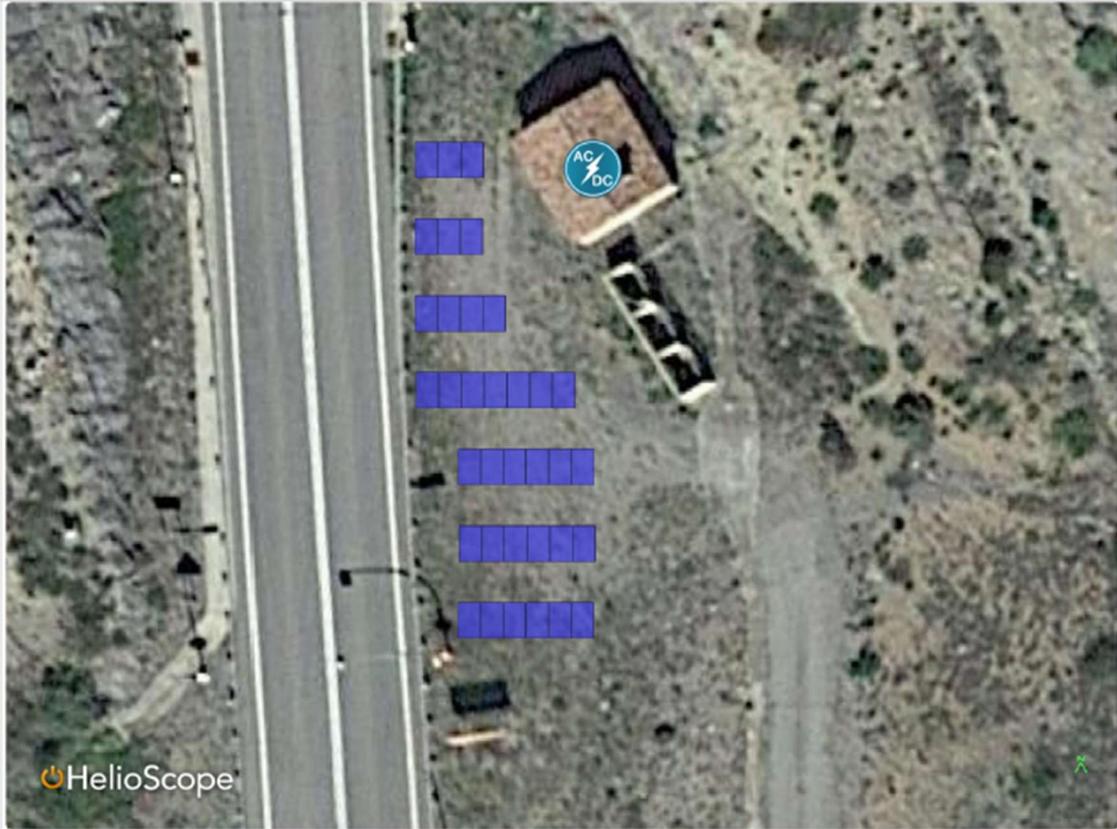
Condition Set												
Description	Condition Set 1											
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, meteorom (meteorom)											
Solar Angle Location	Meteo Lat/Lng											
Transposition Model	Perez Model											
Temperature Model	Sandia Model											
Temperature Model Parameters	Rack Type	a	b	Temperature Delta								
	Fixed Tilt	-3.56	-0.075	3°C								
	Flush Mount	-2.81	-0.0455	0°C								
	East-West	-3.56	-0.075	3°C								
	Carport	-3.56	-0.075	3°C								
Soiling (%)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Irradiation Variance	5%											
Cell Temperature Spread	4°C											
Module Binning Range	-2.5% to 2.5%											
AC System Derate	0.50%											
Module Characterizations	Module	Uploaded By	Characterization									
	JAM66S30-50S/MR (1000V) (JA Solar)	HelioScope	Spec Sheet Characterization, PAN									
Component Characterizations	Device	Uploaded By	Characterization									
	SUN2000-17KTL-M0 (Huawei)	HelioScope	Spec Sheet									

Components		
Component	Name	Count
Inverters	SUN2000-17KTL-M0 (Huawei)	1 (17.0 kW)
AC Panels	1 input AC Panel	1
AC Home Runs	4 AWG (Copper)	2 (63.6 ft)
Strings	3 AWG (Copper)	2 (175.9 ft)
Module	JA Solar, JAM66S30-50S/MR (1000V) (505W)	35 (17.7 kW)

Wiring Zones			
Description	Combiner Poles	String Size	Stringing Strategy
Wiring Zone	-	17-18	Along Racking

Field Segments									
Description	Racking	Orientation	Tilt	Azimuth	Intrarow Spacing	Frame Size	Frames	Modules	Power
Field Segment 1	Fixed Tilt	Portrait (Vertical)	30°	180°	6.9ft	1x1	35	35	17.7kW

Detailed Layout



ANEXO V. RESULTADOS PVSYSYSTEM



Version 7.3.1

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Túnel de Erinyà PVGIS

Variant: Nueva variante de simulación

No 3D scene defined, no shadings

System power: 17.68 kWp

Túnel de Erinyà - Spain

Autor(a)



Project: Túnel de Erinyà PVGIS

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.3.1

VC0, Simulation date:
06/01/23 19:44
with v7.3.1

Project summary

Geographical Site Túnel de Erinyà Spain	Situation Latitude 42.29 °N Longitude 0.94 °E Altitude 637 m Time zone UTC+1	Project settings Albedo 0.20
Meteo data Puigcerver, T.ERINYÀ-BS PVGIS api TMY		

System summary

Grid-Connected System PV Field Orientation Fixed plane Tilt/Azimuth 30 / 0 °	No 3D scene defined, no shadings Near Shadings No Shadings	User's needs Unlimited load (grid)
System information PV Array Nb. of modules 35 units Pnom total 17.68 kWp		
Inverters Nb. of units 1 unit Pnom total 17.00 kWac Pnom ratio 1.040		

Results summary

Produced Energy	32415 kWh/year	Specific production	1834 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	86.27 %
-----------------	----------------	---------------------	-------------------	----------------	---------

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	5
Loss diagram	6
Predef. graphs	7



Project: Túnel de Erinyà PVGIS

Variante: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.3.1

VC0, Simulation date:
06/01/23 19:44
with v7.3.1

General parameters

Grid-Connected System		No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation		Sheds configuration	Models used
Orientation		No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane			Diffuse Imported
Tilt/Azimuth	30 / 0 °		Circumsolar separate
Horizon		Near Shadings	User's needs
Free Horizon		No Shadings	Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	JAM66S30-505/MR	Model	SUN2000-17KTL-M2-400V
(Custom parameters definition)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	505 Wp	Unit Nom. Power	17.0 kWac
Number of PV modules	35 units	Number of inverters	1 unit
Nominal (STC)	17.68 kWp	Total power	17.0 kWac
Array #1 - Subconjunto1		Number of inverters	1 * MPPT 50% 0.5 unit
Number of PV modules	17 units	Total power	8.5 kWac
Nominal (STC)	8.59 kWp		
Modules	1 String x 17 In series	Operating voltage	160-950 V
At operating cond. (50°C)		Max. power (=>55°C)	18.7 kWac
Pmpp	7.85 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.01
U mpp	587 V		
I mpp	13 A		
Array #2 - Subconjunto2		Number of inverters	1 * MPPT 50% 0.5 unit
Number of PV modules	18 units	Total power	8.5 kWac
Nominal (STC)	9.09 kWp		
Modules	1 String x 18 In series	Operating voltage	160-950 V
At operating cond. (50°C)		Max. power (=>55°C)	18.7 kWac
Pmpp	8.31 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.07
U mpp	622 V		
I mpp	13 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	18 kWp	Total power	17 kWac
Total	35 modules	Number of inverters	1 unit
Module area	83.1 m ²	Pnom ratio	1.04
Cell area	2310 m ²	No Power sharing	

Array losses

Thermal Loss factor		Module Quality Loss		Module mismatch losses	
Module temperature according to irradiance		Loss Fraction	0.0 %	Loss Fraction	2.0 % at MPP
Uc (const)	20.0 W/m ² K				
Uv (wind)	0.0 W/m ² K/m/s				
Strings Mismatch loss					
Loss Fraction	0.1 %				



Project: Túnel de Erinyà PVGIS

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.3.1

VC0, Simulation date:
06/01/23 19:44
with v7.3.1

Array losses

IAM loss factor

Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.403	0.000

DC wiring losses

Global wiring resistance 10 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC

Array #1 - Subconjunto1

Global array res. 728 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC

Array #2 - Subconjunto2

Global array res. 771 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC



Project: Túnel de Erinyà PVGIS

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.3.1

VC0. Simulation date:
06/01/23 19:44
with v7.3.1

Main results

System Production

Produced Energy

32415 kWh/year

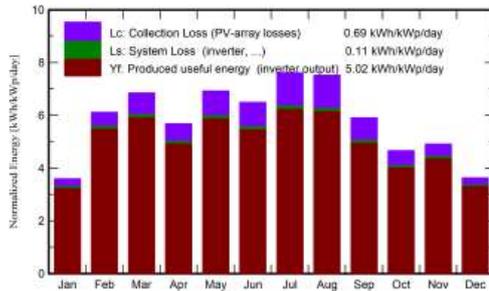
Specific production

1834 kWh/kWp/year

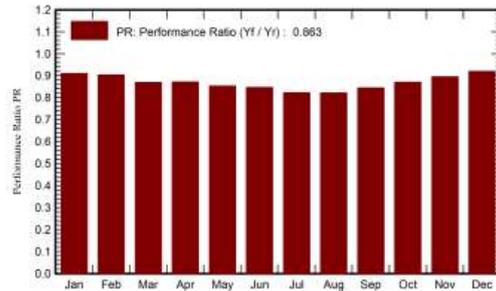
Performance Ratio PR

86.27 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	64.5	25.96	4.26	111.4	108.5	1834	1792	0.910
February	106.3	22.39	1.11	171.1	167.4	2790	2733	0.904
March	159.8	38.05	8.62	212.3	207.1	3331	3263	0.869
April	154.9	63.15	9.79	170.5	165.9	2686	2627	0.872
May	213.0	64.51	13.57	214.7	208.6	3307	3236	0.853
June	201.0	73.47	17.39	194.8	189.1	2980	2915	0.847
July	236.7	63.54	22.19	236.0	229.8	3506	3432	0.823
August	215.8	53.65	22.47	233.3	227.0	3460	3388	0.822
September	146.4	52.20	18.00	177.1	172.6	2702	2644	0.845
October	103.2	40.36	12.63	144.4	141.0	2271	2222	0.870
November	83.5	22.25	5.48	147.5	144.0	2382	2332	0.895
December	60.8	22.96	2.57	112.6	110.0	1871	1831	0.920
Year	1746.0	542.50	11.58	2125.8	2071.1	33120	32415	0.863

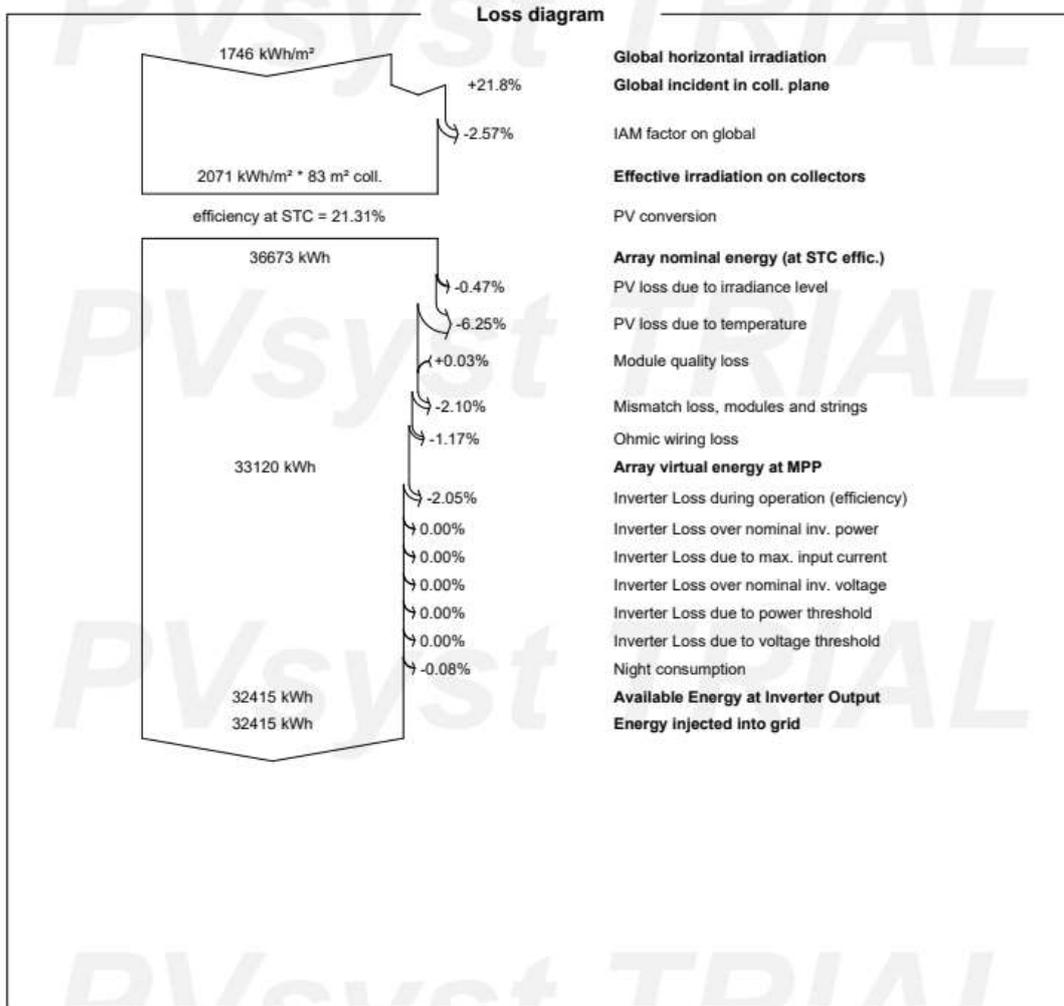
Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		



Project: Túnel de Erinyà PVGIS
 Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.3.1
 VCO, Simulation date:
 06/01/23 19:44
 with v7.3.1





Project: Túnel de Erinyà PVGIS

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.3.1

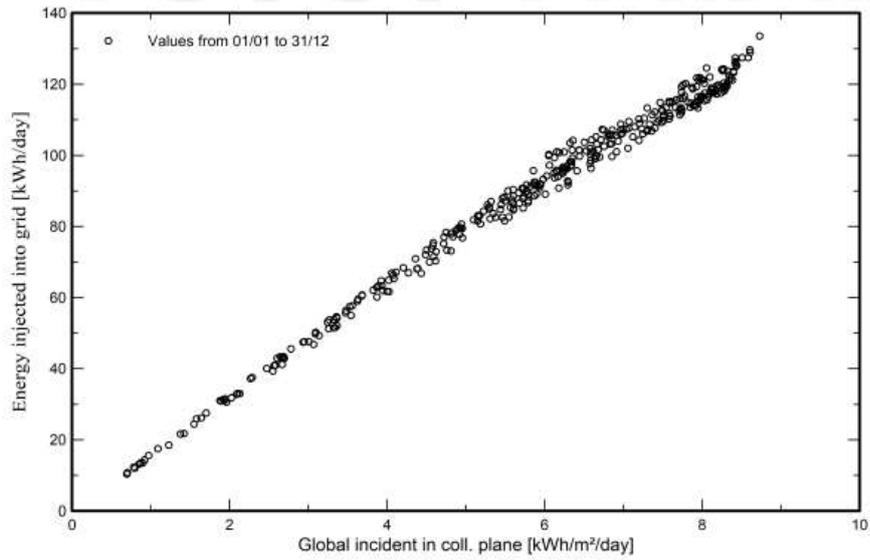
VC0. Simulation date:

06/01/23 19:44

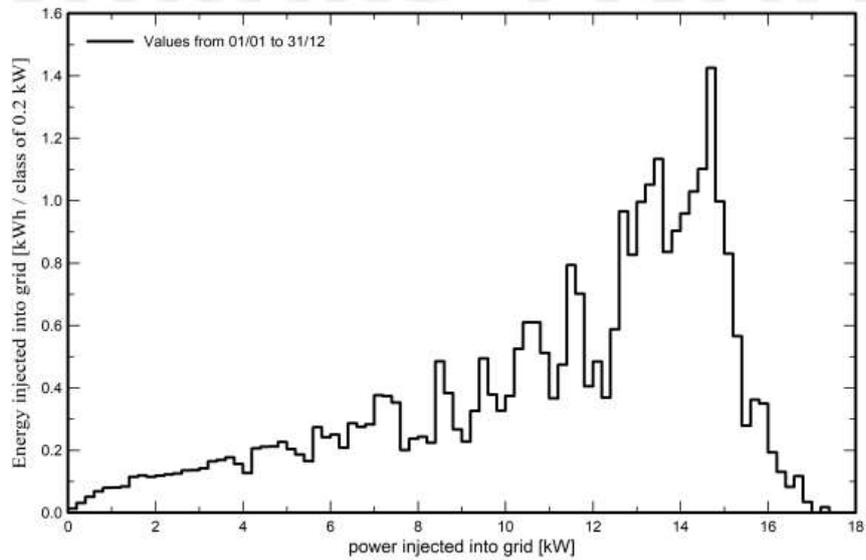
with v7.3.1

Predef. graphs

Diagrama entrada/salida diaria



Distribución de potencia de salida del sistema



ANEXO VI. FICHAS TÉCNICAS DE EQUIPOS



Higher output power



Lower LCOE



Less shading and lower resistive loss



Better mechanical loading tolerance

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty

0.55% Annual Degradation Over 25 years



■ New linear power warranty ■ Standard module linear power warranty

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730, UL 61215, UL 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- ISO 45001: 2018 Occupational health and safety management systems
- IEC TS 62941: 2016 Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Guidelines for increased confidence in PV module design qualification and type approval



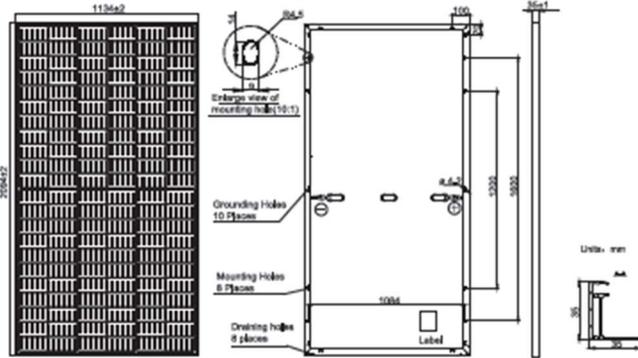
JA SOLAR

www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests, JA Solar reserves the right of final interpretation.



MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	26,3kg±3%
Dimensions	2094±2mm×1134±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	132(6×22)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4,10(1000V) QC 4,10-35(1500V)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1200mm(+)/1200mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/Pallet, 682pcs/40ft Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM66S30 -480/MR	JAM66S30 -485/MR	JAM66S30 -490/MR	JAM66S30 -495/MR	JAM66S30 -500/MR	JAM66S30 -505/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	480	485	490	495	500	505
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	45,07	45,20	45,33	45,46	45,59	45,72
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	37,62	37,81	37,99	38,17	38,35	38,53
Short Circuit Current(Isc) [A]	13,65	13,72	13,79	13,86	13,93	14,00
Maximum Power Current(Imp) [A]	12,76	12,83	12,90	12,97	13,04	13,11
Module Efficiency [%]	20,2	20,4	20,6	20,8	21,1	21,3
Power Tolerance	0~±5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

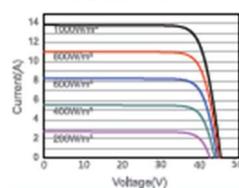
TYPE	JAM66S30 -480/MR	JAM66S30 -485/MR	JAM66S30 -490/MR	JAM66S30 -495/MR	JAM66S30 -500/MR	JAM66S30 -505/MR
Rated Max Power(Pmax) [W]	363	367	370	374	378	382
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	42,15	42,30	42,43	42,56	42,72	42,86
Max Power Voltage(Vmp) [V]	35,54	35,67	35,76	35,84	35,93	36,02
Short Circuit Current(Isc) [A]	10,99	11,06	11,13	11,20	11,27	11,34
Max Power Current(Imp) [A]	10,21	10,28	10,36	10,44	10,52	10,60
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					

OPERATING CONDITIONS

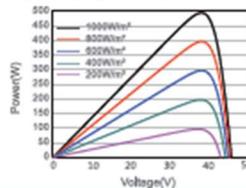
Maximum System Voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40 C ~ +85 C
Maximum Series Fuse Rating	25A
Maximum Static Load, Front*	5400Pa(112lbf/ft ²)
Maximum Static Load, Back*	2400Pa(50lbf/ft ²)
NOCT	45±2 C
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 1

CHARACTERISTICS

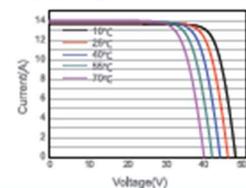
Current-Voltage Curve JAM66S30-495/MR



Power-Voltage Curve JAM66S30-495/MR



Current-Voltage Curve JAM66S30-495/MR



Premium Cells, Premium Modules

Version No. : Global_EN_20200923A

Smart String Inverter



Seguridad activa

Protección contra arcos eléctricos active con tecnología de IA



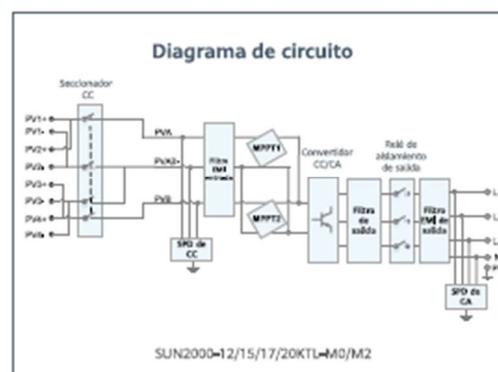
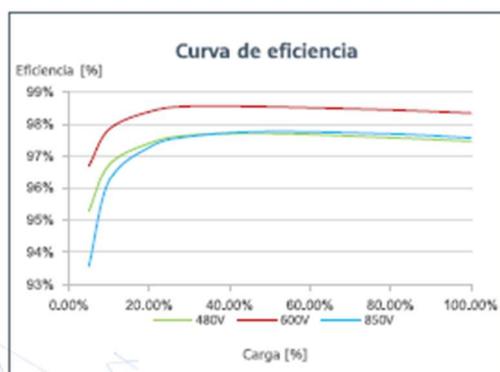
Mayor rendimiento

Hasta un 30 % más de energía con optimizadores ¹



Comunicación flexible

WiFi, Fast Ethernet, 4G
Comunicación soportada



¹ Solo aplicable al inversor SUN2000-M2, #/CN: 8 15, #/Intranet: 8 17, #/Intranet: 8 20KTL-M2.

SOLAR.HUAWEI.COM/ES/

SUN2000-12/15/17/20KTL-M0
Especificaciones técnicas

Especificaciones técnicas	SUN2000 -12KTL-M0	SUN2000 -15KTL-M0	SUN2000 -17KTL-M0	SUN2000 -20KTL-M0
Eficiencia				
Máxima eficiencia	98.50%	98.65%	98.65%	98.65%
Eficiencia europea ponderada	98.00%	98.30%	98.30%	98.30%
Entrada				
Potencia FV máxima de entrada	24,000 Wp	29,760 Wp	29,760 Wp	29,760 Wp
Tensión máxima de entrada ¹	1,080 V			
Rango de tensión de operación ²	160 V ~ 950 V			
Tensión de arranque	200 V			
Tensión nominal de entrada	600 V			
Intensidad de entrada máxima por MPPT	22 A			
Intensidad de cortocircuito máxima	30 A			
Cantidad de MPPTs	2			
Cantidad máxima de entradas por MPPT	2			
Salida				
Conexión a red eléctrica	Tres fases			
Potencia nominal activa de CA	12,000 W	15,000 W	17,000 W	20,000 W
Máx. potencia aparente de CA	13,200 VA	16,500 VA	18,700 VA	22,000 VA
Tensión nominal de Salida	220 Vac / 380 Vac, 230 Vac / 400 Vac, 3W + N + PE			
Frecuencia nominal de red de CA	50 Hz / 60 Hz			
Máx. intensidad de salida	20 A	25.2 A	28.5 A	33.5 A
Factor de potencia ajustable	0,8 capacitivo ... 0,8 inductivo			
Máx. distorsión armónica total	≤ 3 %			
Características y protecciones				
Dispositivo de desconexión del lado de entrada	Sí			
Protección anti-isla	Sí			
Protección contra sobreintensidad de CA	Sí			
Protección contra cortocircuito de CA	Sí			
Protección contra sobretensión de CA	Sí			
Protección contra polaridad inversa CC	Sí			
Protección contra descargas atmosféricas CC	Type II			
Protección contra descargas atmosféricas CA	Sí, Clase de protección T _{PO} II compatible según EN / IEC 61643-11			
Monitorización de corriente residual	Sí			
Protección contra fallas de arco	Sí			
Control del receptor Ripple	Sí			
Datos generales				
Rango de temperatura de operación	-25 ~ + 60 °C			
Humedad de operación relativa	0 % RH ~ 100% RH			
Altitud de operación	0 - 4,000 m (disminución de la capacidad eléctrica a partir de los 2,000 m)			
Ventilación	Convección natural			
Pantalla	LED Indicators			
Comunicación	RS485; WLAN / Ethernet a través de Smart Dongle-WLAN-FE (Opcional) 4G / 3G / 2G a través de Smart Dongle-4G (Opcional)			
Peso (incluida ménsula de montaje)	25 kg			
Dimensiones (incluida ménsula de montaje)	525 x 470 x 262 mm			
Grado de protección	IP65			
Consumo de energía durante la noche	< 5,5 W			
Cumplimiento de estándares (más opciones disponibles previa solicitud)				
Seguridad	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2			
Estándares de conexión a red eléctrica	G98, G99, EN 50438, CEI 0-21, CEI 0-16, VDE-AR-N-4105, VDE-AR-N-4110, AS 4777, C10/11, ABNT, UTE C15-712, RD 1699, RD 661, PO 12.3, TOR D4, IEC61727, IEC62116, DEWA			

¹ El voltaje de entrada máximo es el límite superior del voltaje de CC. Cualquier voltaje DC de entrada más alto probablemente dañaría el inversor.
² Cualquier voltaje de entrada de CC más allá del rango de voltaje de funcionamiento puede provocar un funcionamiento incorrecto del inversor.