



Trabajo Fin de Grado

Proyecto de automatización de un sistema de ventilación minera subterráneo

Automation Project for an Underground Mine Ventilation System

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros

Autor: Juan Arruzas Insua

Director: Luis Vejo Fernández

Convocatoria: Junio 2025



Proyecto de automatización de un sistema de ventilación minera subterráneo

El presente trabajo final de grado aborda el diseño e implementación de un sistema automatizado de ventilación en el contexto de minas subterráneas. Se busca, con ello, mejorar la seguridad para los trabajadores, la eficiencia energética y la sostenibilidad operativa.

La propuesta y análisis llega en un contexto geopolítico donde la extracción de materiales críticos se vuelve estratégica para la autonomía y desarrollo de la Unión Europea, resultando necesario modernizar todo lo posible los sistemas auxiliares claves como la ventilación minera.

Para ello, además de hacer un análisis de la ventilación desde un punto de vista teórico, se desarrolla un prototipo funcional basado en la tecnología Arduino. Este prototipo permite activar la ventilación auxiliar en función de ciertos umbrales establecidos de temperatura, concentración de gas o humedad, gracias a un monitoreo continuo. Se realiza un análisis comparativo entre sistemas tradicionales y automatizados a través de cálculos, diferentes situaciones o simulaciones numéricas de millones de escenarios.

De este modo el proyecto expone la eficiencia que puede suponer implementar procesos automatizados y lo traslada a un prototipo académico manual y que permite ver su funcionamiento a un nivel escalado. Además, se acompaña de los planos y archivos creados, y se publican en acceso abierto para contribuir a su perfil de divulgación de conocimiento, quedando el proyecto fácilmente replicable y modificable.

Juan Arruzas Insua



Automation Project for an Underground Mine Ventilation System

This final degree project addresses the design and implementation of an automated ventilation system for underground mining environments. The aim is to improve worker safety, energy efficiency, and operational sustainability.

The proposal and analysis arise in a geopolitical context where the extraction of critical materials has become strategic for the autonomy and development of the European Union, making it necessary to modernize key auxiliary systems such as mine ventilation.

To this end, in addition to a theoretical analysis of ventilation systems, a functional prototype based on Arduino technology has been developed. This prototype allows the activation of auxiliary ventilation depending on pre-established thresholds of temperature, gas concentration, or humidity, through continuous monitoring. A comparative analysis between traditional and automated systems is carried out through calculations, various scenarios, and numerical simulations involving millions of cases.

In this way, the project demonstrates the potential efficiency gains from implementing automated processes and presents a manual, academic-scale prototype that allows observation of its operation. It is also accompanied by the necessary plans and documentation to facilitate replication.

Juan Arruzas Insua



Agradecimientos

Me gustaría expresar mi agradecimiento a quienes me han acompañado en este bonito camino:

A mis padres y hermanos,
por vuestro cariño incondicional. Sois los que me habéis inculcado los valores que me hacen ser quien soy. Gracias por la paciencia, por estar siempre ahí y por haberme dado todo. Os quiero.

A mis abuelos, tíos y primos,
por todas las vivencias y experiencias, desde Galicia hasta Cantabria.

A mis amigos de toda la vida,
por todos los momentos que hemos vivido y los que nos quedan. Porque me habéis acompañado desde infantil hasta el bachillerato, y el camino ha sido mucho más fácil con vosotros. Siempre nos hemos ayudado y hemos tratado de ser mejores, tanto dentro como fuera de las aulas. Los momentos vividos son imborrables e incontables, y seguiremos compartiendo mucho más. Por toda una vida juntos.

A la Universidad de Cantabria y especialmente a la Escuela de Minas,
*por darme no solo la formación académica, sino la oportunidad de conocer a gente nueva y maravillosa. Son muchos los nombres de amigos que me llevo para toda la vida, pero me gustaría hacer una mención especial a **Hugo, Alejandra, Emilio, Pedro, Gaby y Daniela.** Gracias por ser como sois y por haber formado el grupo que tenemos. En este breve periodo habéis pasado a ser un pilar fundamental en mi vida. SMP para siempre. También quería acordarme de Pepe, Edu y Bocos, por todas las risas y momentos. A los más mayores, Dani, Joel o Lucía, gracias por acogerme desde el primer día y aconsejarme. Al gran grupo que conocí en Cracovia, gracias por tantas risas y anécdotas en unos meses inolvidables. De Cubano a Coco, pasando por Noruega o Budapest.*

A todos los profesores que me han acompañado en el camino,
tanto en el colegio como en el instituto. Me habéis enseñado mucho y habéis hecho que siempre busque ser mejor. En especial, me gustaría agradecer a todos los profesores que me han impartido clases durante estos 4 años. Gracias por aconsejarme, exigirme y ayudarme.

A mi tutor, Luis Vejo Fernández,
por acompañarme durante este proceso y estar disponible en todo momento para echar una mano. Gracias por tus clases (pese a ese accidente el primer año han sido de lo mejor). Siempre las recordaré con mucho cariño y aprecio.

Y por último, a nuestro querido director Manolo:
Gracias por ser como has sido con nosotros. Por acogernos desde el primer día, por defender siempre a la escuela y luchar por ella. Por las clases de Topografía que uno nunca olvidará. Por los chascarrillos y las frases inolvidables. "Porque no hace falta ser ingeniero pa' esto". Gracias Manolo, descanse en paz.

Gracias, Juan

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. CONTEXTO GEOPOLÍTICO Y MEDIOAMBIENTAL ACTUAL	11
1.2. SISTEMAS AUXILIARES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA	13
1.2.1. Diferencia entre los tipos de minería	13
1.2.2. Importancia de la minería subterránea y sus sistemas	14
1.3. LA VENTILACIÓN COMO ELEMENTO CRÍTICO	15
1.4. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN MINERA	16
1.4.1. Antecedentes y Métodos Tradicionales	17
1.4.2. Modernización y Avances Tecnológicos	18
1.4.3. Uso de inteligencia artificial	19
2. ESTADO DEL ARTE	20
2.1. TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS ACTUALES DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA	20
2.1.1. Ventilación natural	21
2.1.2. Ventilación mecánica o forzada	22
2.1.3. Ventilación aspirante y soplante	22
2.1.4. Tipos de conductos o mangas de ventilación	23
2.1.5. Ventiladores	24
2.1.6. Ventiladores en serie y en paralelo	32
2.1.7. Ventilación principal y secundaria	33
2.1.8. Reguladores de aire y puertas de ventilación	35
2.1.9. Pozos y chimeneas	36
2.1.10. Redes de conductos, difusores y sistemas de extracción de polvo.	39
2.1.11. El polvo	40
2.1.12. Métodos de cálculo y software	41
2.2. DISEÑO DE LA VENTILACIÓN	46

2.3.	PROBLEMAS ABORDADOS POR LAS TECNOLOGÍAS Y RETOS PENDIENTES	50
2.4.	AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INTELIGENTE	54
2.4.1.	Componentes	56
3.	PLIEGO DE CONDICIONES	62
3.1.	OBJETO Y ALCANCE	62
3.2.	REQUISITOS FUNCIONALES Y TÉCNICOS	63
3.3.	NORMATIVA	63
4.	METODOLOGÍA E INNOVACIÓN	67
4.1.	PREÁMBULO	67
4.2.	TOMA DE DECISIONES TÉCNICAS	67
4.2.1.	Componentes eléctricos	67
4.2.2.	Materiales constructivos	68
4.2.3.	Otras decisiones	69
4.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZADO	70
4.3.1.	Objetivo del sistema	70
4.3.2.	Características de los componentes usados	71
4.3.3.	Diagramas del sistema	74
4.3.4.	Código de Arduino IDE	78
4.4.	MONTAJE DEL PROTOTIPO	95
4.5.	COMPROBACIÓN FINAL DEL SISTEMA	99
4.6.	MANTENIMIENTO NECESARIO	105
5.	ESTUDIO DE VIABILIDAD, EFICENCIA ENERGÉTICA Y ECONÓMICA	106
5.1.	CONSIDERACIONES	106
5.2.	COMPARACIÓN Y ESCALABILIDAD	106
5.3.	ESTUDIO DE LA EFICIENCIA	107
5.4.	PROTOTIPO AUTOMATIZADO	108
5.4.1.	Datos medidos y cálculos	108
5.5.	PROTOTIPO TRADICIONAL	112
5.6.	ANALOGÍA DEL PROTIPO CON EL ESCALADO	113
5.7.	CÁLCULOS DE LOS MODELOS ESCALADOS	118
6.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	119

6.1. AHORRO ENTRE EL PROTOTIPO TRADCCIONAL Y EL AUTOMATIZADO:	119
6.2. AHORRO ENTRE EL MODELO ESCALADO TRADCCIONAL Y EL AUTO- MATIZADO:	119
6.3. AHORRO ECONÓMICO	120
6.4. EMISIONES DE CO ₂ EVITADAS	122
6.5. SEGURIDAD Y SALUD COMO FACTOR DETERMINANTE	124
6.6. ANÁLISIS FINAL DE LOS RESULTADOS	130
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	131
7.1. CONCLUSIONES	131
7.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	131
8. BIBLIOGRAFÍA	133
A. ANEXO	136
A.0.1. PLANOS	136
A.0.2. ARCHIVOS .STL Y CÓDIGO	144

Índice de figuras

1.1. Componentes de un móvil. Fuente:[4]	11
1.2. Producción y demanda mundial de tierras raras. Fuente [26]	12
1.3. Protestas en Ciudad Real, 2017. Fuente: [19]	13
1.4. Mina a cielo abierto	13
1.5. Minería subterránea	14
1.6. Conductos de ventilación. Fuente:[25]	15
1.7. Ventilación principal y secundaria	17
1.8. Fotografía del interior de la mina Exito. Fuente: [21]	18
1.9. Software moderno Ventisim. Fuente: [16].	19
2.1. Tubo con flujo de aire	20
2.2. Esquema de ventilacion natural. Fuente:[11]	21
2.3. Esquema de ventilacion mecánica. Fuente:[5]	22
2.4. Representación visual. Fuene:[11]	23
2.5. Manga flexible con anillos metálicos	23
2.6. Manga rígida	24
2.7. Ventilador en la boca de acceso	24
2.8. Ventilador axial PLANETFAN	25
2.9. Ventilador centrífugo	26
2.10. Curva caracterísitca de un ventilador axial. Fuente [15]	27
2.11. Curva de un axial con ángulo variable. Fuente [15]	28
2.12. Curva potencia-caudal teórica de un centrífugo.Fuente [15]	28
2.13. Curva potencia-caudal real de un centrífugo. Fuente [15]	29
2.14. Curva presión-caudal teórica de un centrífugo. Fuente [15]	29
2.15. Curva presión-caudal real de un centrífugo. Fuente [15]	30
2.16. Gráfica de ventiladores en serie. Fuente: [23]	32
2.17. Curva característica de ventiladores conectados en serie. Fuente [15]	32
2.18. Ventiladores en paralelo	33

2.19. Curva característica de ventiladores conectados en paralelo. Fuente [15]	33
2.20. Ventilacion con entrada y salida. Fuente:[15]	34
2.21. Cruces de aire	34
2.22. Compuerta de ventilación de MDM	36
2.23. Pozo con ventilación	37
2.24. Castillete y pozo de la mina de Reocin	37
2.25. Esquema donde se ve una chimenea. Fuente:[18]	38
2.26. Ventilador principal en la boca de un pozo	38
2.27. Representación de los dos accesos	39
2.28. Ducto flexible	39
2.29. Difusor	40
2.30. Colector de polvo	41
2.31. Polvo y otras particulas	41
2.32. Riego con agua para mitigar el polvo	42
2.33. Scrubber	42
2.34. Mecánica de fluidos	42
2.35. Logo de Ventisim	44
2.36. Interfaz del programa Ventisim	44
2.37. Dinámica Computacional de Fluidos	45
2.38. Diseño del sentido de circulación	47
2.39. Valores estimados de pérdida de carga.Extraído de [15]	48
2.40. Pozos de emergencia	49
2.41. Modelo de dispersion de contaminantes	50
2.42. Modelo de mina más compleja en Ventisim	52
2.43. Ventilación bajo demanda	54
2.44. PIC para entornos explosivos	58
3.1. Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	64
4.1. Carriles guía	69
4.2. Placa Elegoo Mega elegida	71
4.3. Pantalla LCD empleada	72
4.4. Sensor MQ-2	72
4.5. Sensor DHT11	73
4.6. Sensor PIR	73

4.7. Ventilador Arctic 12V	74
4.8. Ventilador 5V	74
4.9. Módulo de relés de 4 canales	74
4.10. Diagrama de bloques	78
4.11. Código y salida de valores digital del MQ-2	79
4.12. Valores gráficos del MQ-2	79
4.13. Captura del incremento de la concentración de gas etanol en tiempo real por el autómata mediante el MQ-2	80
4.14. Valores digitales del dht11	81
4.15. Valores gráficos del DHT11	81
4.16. Aumento de temperatura y bajada de humedad al acercar fuente de calor	82
4.17. Variación al alejar la fuente de calor, y punto de encuentro entre temperatura y humedad	82
4.18. Gráfica con las lecturas del DHT11, MQ-2 y estado del ventilador	85
4.19. Activación del ventilador al leer más de 27° cada 8 segundos	85
4.20. Visualización gráfica del funcionamiento del ventilador siempre que la T ^a su- pere el umbral	87
4.21. Visualización digital del funcionamiento del ventilador siempre que la T ^a supere el umbral	87
4.22. Pausa de ventilador y activación del LED al bajar del umbral	89
4.23. Activación de ventilador, buzzer y LED rojo al pasar umbral	89
4.24. Parte superior durante el montaje	95
4.25. Esquema de una galería	96
4.26. Pieza recién impresa con soporte	96
4.27. Sistema instalado con Arduino	97
4.28. Primera pantalla del programa	99
4.29. Segunda pantalla del programa	99
4.30. Tercera pantalla del programa	99
4.31. Cuarta pantalla del programa	100
4.32. Quinta pantalla del programa lista de datos del sistema	100
4.33. Primera lista de datos del sistema	100
4.34. Visualización gráfica de la primera lista	101
4.35. Segunda gráfica de datos del sistema	101
4.36. Paradas del ventilador auxiliar al subpasar el umbral	102
4.37. Momento de activación	102

4.38. Resultado final del sistema	103
4.39. Pantalla LCD con resultados	103
4.40. Esquema de salida del aire viciado	104
4.41. Esquema de circulación del aire	104
5.1. Obtención del bloque del interior	108
5.2. Volumen galería 1	108
5.3. Volumen galería 2	109
5.4. Volumen skip	109
5.5. Volumen del pozo de aire viciado	110
5.6. Ventilador de 25HP (18.6 kW)	115
5.7. Ventilador de 150HP (111.9kW)	116
5.8. Ventilador de 400HP (293.8kW)	117
6.1. Diferencias del consumo del prototipo	119
6.2. Diferencias de consumo escalado	120
6.3. Comparación gasto diraiio en €	122
6.4. Comparación gasto en 5 años en €	122
6.5. Comparación de las emisiojnes anuales	123
6.6. Resultados de las 10 simulaciones del sistema manual	127
6.7. Gráfico de resultados de las 10 simulaciones del sistema manual	127
6.8. Resultados de las 10 simulaciones del sistema automatizado	129
6.9. Gráfico de resultados de las 10 simulaciones del sistema automatizado	129
7.1. Posibilidad de incorporar un monitoreo personalizado	132
A.1. QR con acceso a los archivos .stl	144
A.2. QR con acceso a códigos de Arduino IDE	145

Índice de cuadros

1.1. Límites permisibles de gases en minería subterránea	16
2.1. Comparativa entre ventiladores axiales y centrífugos	26
2.2. Resumen de clasificación y control de ventiladores	31
2.3. Resumen de estudios científicos sobre la automatización minera y sus beneficios	56
3.1. Estados del sistema según condiciones de sensores	63
3.2. Resumen visual de requisitos clave para ventilación en minas subterráneas	66
4.1. Ficha técnica del sensor MQ-2	73
4.2. Conexiones del DHT11	97
4.3. Conexiones del MQ2	97
4.4. Conexiones del sensor PIR	97
4.5. Conexiones del módulo LCD I2C	98
4.6. Conexiones del módulo relé	98
4.7. Conexiones del LED rojo	98
4.8. Conexiones del LED verde	98
4.9. Conexiones del buzzer	98
4.10. Conexiones del ventilador de 5V	98
4.11. Conexiones del ventilador de 12V	99
5.1. Comparativa entre sistema tradicional y sistema automatizado	107
5.2. Caudal de los ventiladores empleados en el prototipo. Fuente:4.2.1	110
5.3. Tiempos de trabajo y potencias de los ventiladores del prototipo	112
5.4. Tiempo y potencia del ventilador único del prototipo	113
5.5. Comparativa de ventiladores: tiempo, potencia y caudal de aire	118
6.1. Precio medio mensual de la electricidad en España (€/MWh) [20]	121
6.2. Comparación entre sistemas de ventilación: consumo, gasto y emisiones	124
6.3. Probabilidades asociadas a riesgos en el sistema	125

6.4. Comparación de sistemas escalados: consumo, gasto, emisiones y seguridad . . 130

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO GEOPOLÍTICO Y MEDIOAMBIENTAL ACTUAL

En la actualidad, la Unión Europea se enfrenta a un importante desafío estratégico: reducir su dependencia de terceros países en el suministro de materias primas críticas buscando reforzar su autonomía en sectores claves dependientes de estas materias, como la energía, la defensa y la tecnología.

Un ejemplo cotidiano es un simple teléfono móvil, que contiene multitud de elementos, como se muestra en la Figura 1.1.

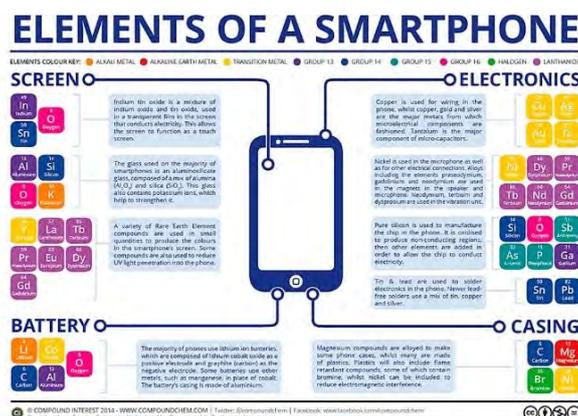


Figura 1.1: Componentes de un móvil. Fuente:[4]

A día de hoy, la UE importa el 98% de sus tierras raras de China, según datos de la comisión europea [8]. Esta dependencia evidencia la necesidad de fortalecer la autonomía tecnológica de la Unión Europea dentro del ámbito minero. Esta situación se agrava por las tensiones crecientes entre potencias como Estados Unidos, Rusia o China, que han convertido los materiales estratégicos en una herramienta de presión comercial y diplomática.

Esto ha llevado a la Comisión Europea a impulsar estrategias como la “Critical Raw Materials Act” European Commission [9] para fomentar la extracción y procesamiento dentro del territorio europeo, fijando objetivos claros y definidos a corto plazo, como llegar a una extracción del 10% dentro de la UE o no depender más del 65% de un único país. Para ello, se ha buscado acelerar los permisos de exploración y extracción y financiar proyectos mineros. Se impulsarán tecnologías avanzadas en extracción y recuperación, buscando una economía más sostenible, circular y autónoma dentro de un entorno seguro y no dañino para el medio ambiente.

España, por su geología, posee yacimientos potenciales de estos minerales estratégicos (Litio, Tungsteno, Cobalto, Niquel, Cobre. . .) y ha quedado señalada por la UE como uno de los



Figura 1.2: Producción y demanda mundial de tierras raras. Fuente [26]

grandes países donde la UE debe obtener estas materias primas estratégicas. Concretamente, de los 47 proyectos estratégicos lanzados el pasado 26 de marzo de 2025, 7 de ellos se encuentran dentro de la península (Galicia, Castilla la Mancha, Andalucía o Extremadura).

Aunque la propiedad de estas minas pertenece principalmente a fondos canadienses o de Estados Unidos, su impacto en España, tanto en términos de exportaciones como de control de materias primas y empleo, será destacable.

En un contexto más regional, hace poco fue noticia como la empresa australiana Variscan Mines encontró un yacimiento de Zinc en la mina de San Jose, entre Udias y Alfoz de Lloredo. El estudio apunta tener al menos medio millón de toneladas de mineral, con una concentración y calidad similares a la antigua mina de Reocin. El escenario más optimista apunta la presencia de hasta 3,4 millones de toneladas. Algunos medios, como el Diario Montañés [17] ya se atreven a poner fecha de reapertura en 2027, con una explotación de hasta una década, 50.000 toneladas anuales y 30 empleados. La empresa se encuentra colaborando con el gobierno de Cantabria evaluando el impacto ambiental y la modernización de la planta. Se siguen investigando lugares de la zona para evaluar su potencial minero.

A pesar del claro interés creciente de extraer materiales críticos tanto para no depender de forma tan extrema de otros países como para crecer económicamente, la minería sigue enfrentándose a un rechazo social bastante generalizado que siempre ha acompañado al sector. Esto se debe a diferentes motivos, como el impacto ambiental visible, contaminación y riesgos para la salud de los trabajadores, los conflictos sociales y laborales o la percepción de ser una actividad "antigua".

Pese a que estos motivos pertenecen mayoritariamente a la antigüedad, hay una clara mejora en cuanto a la comunicación del sector, que ha sido, sin duda, de los que más ha mejorado en términos de seguridad y salud.

En este contexto, los sistemas auxiliares de minería subterránea, y en particular la ventilación, juegan un papel crítico en la reducción de riesgos para los trabajadores y el entorno. La presencia de gases peligrosos como el radón, asociado a formaciones geológicas con tierras raras, hace indispensable el diseño de sistemas de ventilación automatizados, eficientes y adaptativos, que cumplan con las normativas de seguridad vigentes



Figura 1.3: Protestas en Ciudad Real, 2017. Fuente: [19]

1.2 SISTEMAS AUXILIARES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

1.2.1 Diferencia entre los tipos de minería

A la hora de planificar un proyecto es de gran importancia elegir qué método y tecnologías se usarán, para garantizar siempre una seguridad, estabilidad estructural e impacto ambiental, buscando siempre la mayor eficiencia y beneficio posible.

Es por ello que es de gran importancia diferenciar los dos principales tipos de minería; la de cielo abierto de la subterránea.

La minería a cielo abierto se realiza accediendo al mineral desde la superficie, mediante bancos escalonados. El coste inicial suele ser más bajo y por lo general se tiene un menor riesgo estructural. Por otro lado, tanto el impacto visual como el ambiental es mayor.

Por otro lado, la minería subterránea accede al mineral a través de galerías, rampas o pozos, y



Figura 1.4: Mina a cielo abierto

parte de un coste inicial mayor. Este tipo de minería requiere de mayores sistemas críticos, como la ventilación y el sostenimiento. Si bien su impacto en el medio y visual es menor, requiere una mayor complejidad técnica por todo lo que supone trabajar bajo tierra.



Figura 1.5: Minería subterránea

Esta clara diferencia hace que entre los tipos de extracción haya grandes variaciones. Desde los tipos de maquinaria, donde a cielo abierto se suele contar con más espacio y por tanto con máquinas más grandes, capaces de mover un mayor volumen de material, mientras que la maquinaria de minería subterránea debe adaptarse mucho más a las condiciones, garantizando una correcta operatividad y una seguridad máxima en el entorno subterráneo. Como se ha mencionado, varían mucho las diferentes técnicas auxiliares que hay que emplear, como la sostenibilidad o la ventilación en el caso de la minería subterránea.

1.2.2 Importancia de la minería subterránea y sus sistemas

Ante la creciente necesidad de extraer las materias primas críticas en el territorio europeo, es de esperar que una parte significativa de las extracciones se deban centrar en la minería subterránea.

Más concretamente, de las 8 minas que se mencionaron con anterioridad dentro del contexto español y cántabro (los 7 proyectos europeos y la Mina de Udías) 4 de ellas son subterráneas (Doade, El Moto, Cobre las Cruces y Udías) llegando a los 350 metros de profundidad.

Como se ha dicho, la minería subterránea presenta desafíos técnicos, a priori, mucho mayores, especialmente en lo que respecta a la seguridad y a las condiciones ambientales en el interior de la mina. A diferencia de la explotación a cielo abierto, donde la ventilación natural es suficiente, en minería subterránea es imprescindible implementar sistemas de ventilación artificiales que garanticen la renovación del aire, la evacuación de gases tóxicos y el mantenimiento de condiciones respirables para los trabajadores.

Sus sistemas auxiliares constituyen el conjunto de instalaciones, equipos y servicios técnicos que permiten el desarrollo seguro y eficiente de las labores de explotación. Aunque no intervienen directamente en la extracción del mineral, son imprescindibles para mantener las condiciones de trabajo, garantizar la seguridad del personal y optimizar la producción. Así, se destacan la ventilación, el bombeo de aguas, el suministro eléctrico, las comunicaciones. . .

Por ello, este proyecto se centra en el diseño y automatización de un sistema de ventilación subterránea, dada su relevancia crítica dentro del conjunto de sistemas auxiliares que garantizan una explotación minera segura y eficiente.

1.3 LA VENTILACIÓN COMO ELEMENTO CRÍTICO

La ventilación en términos de minería subterránea es el sistema auxiliar que permite mantener una atmósfera segura y adecuada en el interior de la mina. La ventilación consta de varias partes, como el aporte de oxígeno, la dilución y extracción de gases inflamables o tóxicos, ya sean desprendidos, generados en el interior de la mina o producto de las diferentes operaciones de laboreo (voladuras, el motor de la propia maquinaria ya sea en labores de arranque, carga o transporte, la trituración. . .). También del control de la humedad, del polvo o de la temperatura, tratando de garantizar siempre la seguridad y salud de los trabajadores y la optimización de productividad de las operaciones mineras.



Figura 1.6: Conductos de ventilación. Fuente:[25]

A día de hoy, una mina sin un sistema de ventilación bien planificado es inviable, ya no solo por la importante salud de los trabajadores (evitar accidentes o situaciones inseguras, asfixias o paralización de las labores por ambientes no seguros) sino porque sin ella se aumenta el desgaste de la maquinaria.

Es tal la importancia, que hasta la mitad del consumo eléctrico total de una mina está destinado tan solo a este proceso, según Souza [24].

Aunque el concepto de ventilación sea bastante simple, este supone una gran complejidad técnica, variando mucho en función de la situación en la que se desarrolle. El sistema deberá tener en cuenta todos los parámetros y maquinaria que aparezcan en el entorno, requiriendo un diseño preciso con un mantenimiento continuo, un monitoreo y una simulación computacional.

Es por ello que se ha de realizar un gran estudio de las características de la atmósfera de la mina, incluyendo lo siguiente:

- Composición de la atmósfera
 - Oxígeno
 - Nitrógeno
 - Monóxido de carbono
 - Dióxido de carbono

- Hidrógeno
- Otro tipo de gases
 - Grisú
 - Radón
 - Aldehídos
- Contaminación de los motores
- Humedad y temperatura
- Polvo

Cuadro 1.1: Límites permisibles de gases en minería subterránea

Gas	PPM promedio (8h)	PPM corto plazo	Norma
Monóxido de carbono (CO)	25	400	ACGIH 2023
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.2	1	ACGIH 2023
Dióxido de azufre (SO ₂)	0.25	0.5	ACGIH 2023
Metano (CH ₄)	1.0 % LEL	—	NIOSH
Oxígeno (O ₂)	+19.5 %	—	NIOSH
Hidrógeno sulfurado (H ₂ S)	1	5	ACGIH 2023

Datos extraídos del capítulo 3.3.

Debe estar bien estipulado como se controla cada una de estas partes, fragmento bien definida en la legislación de cada territorio (España, en este caso) y en la que se profundizará más adelante.

Además, aparecen dos tipos de ventilación, la principal y la secundaria.

Ventilación Principal: Es el proceso mediante el cual el aire circula por el interior de la mina para garantizar una atmósfera segura para los trabajadores. Se basa en un circuito de ventilación que recorre todas las labores mineras y se regula según la cantidad de trabajadores, tipo de maquinaria, sección de las labores y otros factores. Es imprescindible para renovar el aire contaminado y proveer oxígeno.

Ventilación Secundaria: Se aplica en zonas donde la ventilación principal no alcanza, como frentes de trabajo alejados o con acceso limitado. Se instalan tuberías de ventilación que llevan el aire fresco a estas áreas específicas. Es fundamental para zonas en desarrollo o de difícil acceso.

1.4 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN MINERA

La ventilación en las minas subterráneas ha sido desde siempre un factor crítico para la seguridad de los trabajadores y la eficiencia de las operaciones. Una adecuada circulación de aire

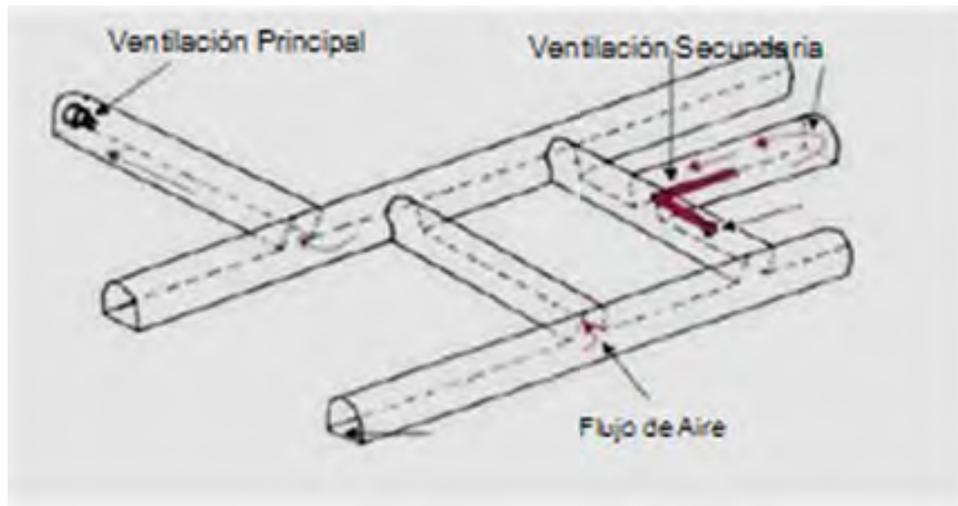


Figura 1.7: Ventilación principal y secundaria

diluye y elimina gases tóxicos, polvo en suspensión y calor excesivo, protegiendo la salud de los mineros y previniendo explosiones de grisú.

A lo largo de la historia, especialmente en España, los métodos de ventilación minera han evolucionado de técnicas tradicionales rudimentarias a sistemas modernos automatizados. A continuación, se realiza una visión general de esta evolución, con énfasis en el contexto español, destacando los avances tecnológicos clave y su impacto en la seguridad y la eficiencia operativa de las minas.

1.4.1 Antecedentes y Métodos Tradicionales

En la minería antigua predominaba la ventilación natural, aprovechando las corrientes de aire generadas por diferencias de temperatura entre el interior de la mina y la superficie, o por desniveles entre. Para reforzar este flujo natural, se empleaban métodos empíricos: por ejemplo, dejar caer cascadas de agua por los pozos para impulsar aire fresco, o encender hogueras en los piques para crear corrientes ascendentes que extrajesen el aire. Estas técnicas, ingeniosas para su época, resultaban a menudo insuficientes en minas profundas con acumulación de gases tóxicos. De hecho, según [2], ya en el siglo XVIII se documentan en España graves deficiencias de ventilación: en la mina de mercurio de Almadén, el científico Jorge Juan observó que la escasa circulación de aire y la falta de lumbreras (pozos de ventilación) generaban atmósferas viciadas que enfermaban a los trabajadores. Este temprano reconocimiento de los riesgos motivó la búsqueda de soluciones más efectivas.

Con la Revolución Industrial, la ventilación minera comenzó a transformarse en una disciplina técnica. En 1850 el ingeniero británico John Atkinson sentó las primeras bases científicas de la ventilación de minas, cuantificando la relación entre la pérdida de presión, la velocidad del aire y las dimensiones de las galerías subterráneas. A partir de la segunda mitad del siglo XIX se introdujeron los ventiladores mecánicos accionados por energía externa. Los primeros fueron de tipo centrífugo, movidos inicialmente por máquinas de vapor, molinos de viento o ruedas. La minería española no fue ajena a estos avances: hacia finales del siglo XIX y comienzos del XX, numerosas explotaciones –especialmente de carbón en Asturias y León, y metálicas en Andalucía– comenzaron a instalar ventiladores para complementar o reemplazar la ventilación

natural. Este cambio tecnológico incrementó notablemente la seguridad, al reducir la presencia de grisú y otros gases peligrosos en los entornos subterráneos.



Figura 1.8: Fotografía del interior de la mina Exito. Fuente: [21]

1.4.2 Modernización y Avances Tecnológicos

Durante el siglo XX, los sistemas de ventilación se perfeccionaron y se hicieron más potentes. Tras la Segunda Guerra Mundial surgieron los ventiladores axiales de flujo longitudinal, fruto de los avances en aerodinámica; estos equipos podían mover caudales mucho mayores de aire que los diseños previos y rápidamente se convirtieron en los más utilizados a nivel mundial. La introducción de motores eléctricos facilitó la operación de grandes ventiladores tanto en superficie como en interior de mina. Desde mediados del siglo XX, prácticamente todas las minas españolas profundas adoptaron ventilación forzada con potentes ventiladores principales, complementados por conductos y ventiladores auxiliares para llevar aire fresco hasta los frentes de trabajo más remotos.

En paralelo, la legislación minera fue endureciéndose para garantizar atmósferas respirables en las galerías. Por ejemplo, se estableció la obligatoriedad de contar con al menos dos accesos conectados al subsuelo (boca de entrada y salida de aire) en cada mina, tanto por ventilación como para disponer de salida de emergencia, como establece el Real Decreto 863/1985, explicado en el capítulo 3.3, en el artículo 70. Igualmente, se implementaron inspecciones regulares de la calidad del aire y límites estrictos a concentraciones de gas y polvo. Gracias a estas mejoras tecnológicas y normativas, los accidentes asociados a la mala ventilación (como explosiones por metano) se redujeron drásticamente en las últimas décadas, al igual que la incidencia de enfermedades pulmonares profesionales entre los mineros. La ventilación pasó de ser un factor reactivo a un pilar preventivo fundamental en la planificación minera.

En las últimas décadas, la automatización y el control digital han revolucionado la ventilación subterránea. Las minas modernas emplean extensas redes de sensores ambientales que monitorean en tiempo real los niveles de gases (metano, dióxido de carbono, monóxido), la cantidad

de polvo, la temperatura y la humedad del aire.

Estos sensores están conectados a sistemas informáticos que ajustan automáticamente la velocidad de los ventiladores y la apertura/cierre de compuertas, regulando el flujo de aire según las necesidades de cada zona de trabajo. Asimismo, ha emergido el concepto de ventilación inteligente, que utiliza algoritmos avanzados para optimizar la distribución del aire minimizando a la vez el consumo energético. Por ejemplo, según División Andina [1], la ventilación bajo demanda permite incrementar o disminuir el caudal hacia distintas galerías en función de la presencia de personal o maquinaria, logrando un ahorro de energía significativo, de hasta el 30% sin comprometer la seguridad.

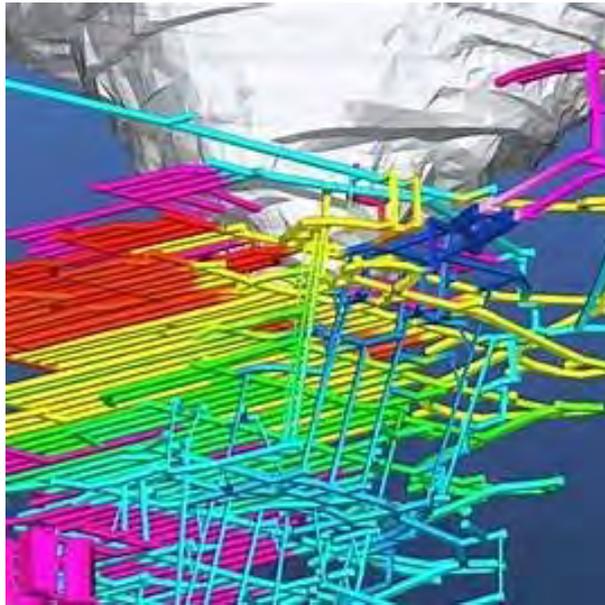


Figura 1.9: Software moderno Ventisim. Fuente: [16].

1.4.3 Uso de inteligencia artificial

Muy recientemente, se exploran aplicaciones de inteligencia artificial (IA) en sistemas de ventilación. Técnicas de machine learning y algoritmos evolutivos se han empezado a aplicar para modelar y predecir con mayor precisión los complejos flujos de aire en una red de ventilación minera. Estas herramientas permiten detectar desviaciones o fallos incipientes (como obstrucciones o fugas) y optimizar la respuesta ante emergencias, calculando rápidamente la ventilación óptima en casos de incendios o explosiones subterráneas.

Aunque el uso de IA en ventilación minera apenas comienza y aún no abarca todos los desafíos, las investigaciones señalan un alto potencial para seguir mejorando la seguridad y eficiencia en operaciones cada vez más profundas y complejas.

En resumen, la ventilación minera ha pasado de ser un sector basado en soluciones naturales y empíricas a convertirse en una ciencia aplicada de alta tecnología. Esta evolución histórica, que se puede ver en la propia minería española, ha permitido trabajar a mayores profundidades con riesgos controlados, mejorando radicalmente las condiciones laborales que se tenían con anterioridad. Los avances en ventilación no solo han salvado innumerables vidas a lo largo del tiempo, sino que continúan potenciando la productividad y eficiencia energética de la minería moderna, cuyo futuro seguirá ligado a la innovación en este aspecto esencial.

2. ESTADO DEL ARTE

La ventilación subterránea es un proceso de gran importancia dentro de la minería para mantener una atmósfera respirable y segura en las labores subterráneas. Esto implica asegurar un suministro continuo de aire fresco que diluya y elimine los polvos o gases nocivos contaminantes, además de regular la humedad y temperatura interna, tiende a incrementarse con la profundidad (el gradiente es aproximadamente de 1° cada 33 metros) .

En el presente apartado se tratará de revisar de forma profunda las diferentes tecnologías y métodos actuales de ventilación subterránea, así como los criterios de diseño empleados referidos a caudales o presiones. También se abordarán los problemas que las tecnologías existentes permiten resolver y los retos técnicos que pueden quedar pendientes. Se tratarán también los avances en automatización y control inteligente de la ventilación.



Figura 2.1: Tubo con flujo de aire

2.1 TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS ACTUALES DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA

Dentro de las diferentes tecnologías y métodos empleados en la ventilación, se diferencian dos grupos de forma clara e intuitiva, como los son la ventilación natural y la ventilación mecánica.

2.1.1 Ventilación natural

La ventilación natural aprovecha las diferencias de presión atmosférica existentes, la temperatura y la elevación entre dos o más accesos de la mina para generar un flujo de aire espontáneo sin ayuda de equipos mecánicos.

En esencia, funciona mediante el efecto que se produce en los fluidos llamado termosifón o tiro térmico. Se produce en el momento en el que estos se calientan y por tanto se dilatan disminuyendo su densidad.

En el caso tratado, donde el fluido es el aire, ocurre lo siguiente: el aire caliente o menos denso tiende a salir por las aberturas superiores (chimeneas o pozos elevados), mientras que el aire más frío y denso ingresa por las aberturas inferiores, estableciendo un circuito natural de circulación.

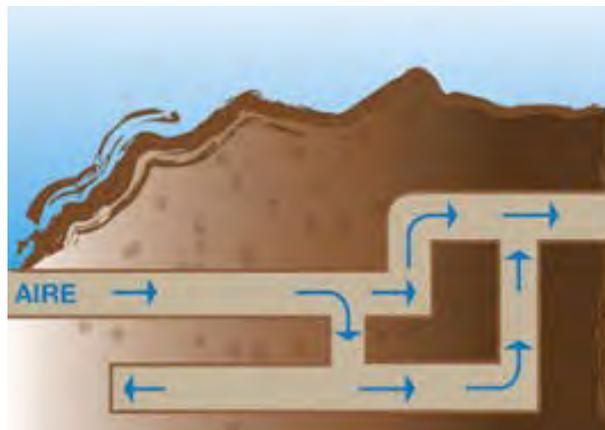


Figura 2.2: Esquema de ventilacion natural. Fuente:[11]

De esta forma y aprovechando un fenómeno físico natural, la única fuerza impulsora es la diferencia de peso específico entre la corriente de aire que entra y el que sale causada por gradientes de temperatura o de presión. Esta diferencia suele acentuarse cuando existe una variación de cota (altura) entre los accesos de la mina (por ejemplo, en minas en ladera con un portal inferior y otro superior, o con dos pozos de distinta altura).

Si bien es un método útil y que puede parecer fácil de entender, la ventilación natural es altamente variable y poco fiable, pues depende de factores ambientales estacionales e incluso del ciclo día-noche, que afectan la temperatura exterior y la presión, pudiendo invertir o reducir el flujo de aire. Además, la capacidad de mover aire mediante ventilación natural es muy limitada haciendo que en la mayoría de las minas modernas no sea suficiente para cumplir los requisitos mínimos de flujo. De hecho, la normativa minera en muchos países exige explícitamente la ventilación mecánica forzada en todas las labores subterráneas activas, prohibiendo confiar únicamente en flujos naturales.

Es por ello que, aunque la ventilación natural fue aprovechada históricamente en explotaciones pequeñas o de poca profundidad, hoy en día se considera solo un complemento circunstancial al sistema de ventilación, ya que por sí sola no garantiza atmósferas seguras de acuerdo con los estándares actuales.

2.1.2 Ventilación mecánica o forzada

La ventilación mecánica, también llamada ventilación forzada, es el método predominante en minería subterránea moderna para asegurar un flujo de aire adecuado.

Consiste en utilizar ventiladores mecánicos, que en su mayoría son eléctricos y ocasionalmente diésel, para impulsar o extraer el aire a través de los circuitos de la mina, suministrando la energía necesaria para mover grandes volúmenes de aire contra la resistencia de las galerías y los equipos presentes.

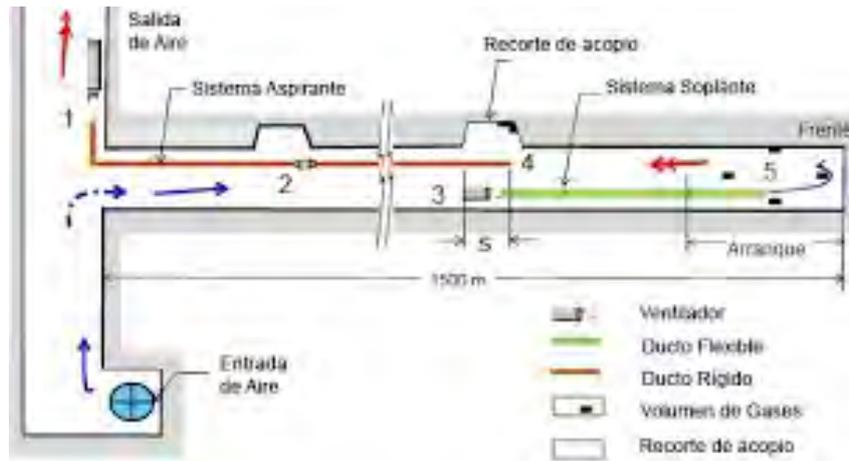


Figura 2.3: Esquema de ventilación mecánica. Fuente:[5]

La ventilación mecánica establece un circuito principal de ventilación que recorre todas las labores de la mina, normalmente configurado de manera que haya al menos un recorrido de entrada de aire fresco (circuito de ingreso) y otro de retorno de aire viciado (circuito de retorno), quedando ambos conectados por el flujo inducido de los ventiladores.

2.1.3 Ventilación aspirante y soplante

Se pueden encontrar dos configuraciones básicas, y nuevamente muy intuitivas: por una lado se tiene la ventilación aspirante o de extracción, y por otro se tiene la soplante o de impulsión. En un sistema aspirante, como su propio nombre indica, el ventilador principal succiona el aire desde el interior de la mina hacia el exterior, generando una ligera depresión interna, de tal manera que el aire fresco ingresa naturalmente por otros pozos o accesos creados con anterioridad.

Aunque pueda parecer algo más complejo crear un flujo suficiente mediante esta configuración, este es un esquema muy habitual en la ventilación principal de muchas regiones del mundo, como por ejemplo en Europa, ya que facilita que el aire viciado sea extraído eficientemente por la salida forzada.

Por otro lado, en un sistema soplante, el ventilador principal impulsa aire fresco hacia el interior, manteniendo una presión dentro de la mina y forzando a que el aire sucio o viciado salga por otros conductos o aberturas.

En resumen, ambos enfoques buscan lograr el mismo objetivo, que no es otro que el renovar el aire, y la elección depende de factores como la distribución de accesos, la presencia de

gases explosivos y las preferencias operativas. A grandes rasgos, ambos crean un flujo de aire dentro de la mina consiguiendo expulsar el aire viciado.



Figura 2.4: Representación visual. Fuente:[11]

2.1.4 Tipos de conductos o mangas de ventilación

A la hora de canalizar el aire de la ventilación se emplean mangas de ventilación o conductos, y estos pueden ser rígidos o flexibles.

La elección de uno u otro depende de sus características y del tipo de ventilación que se use.

- **Conductos flexibles**

Los conductos flexibles suelen ser de PVC, poliéster recubierto y lona plastificada. Cuentan con una serie de anillos metálicos para poder mantener la forma del conducto. Cuentan con diámetros normalizados de entre 30cm y 120cm, caracterizados por un fácil transporte al ser enrollables y ligeros McPherson [15]. No son aptos para la ventilación aspirante, pues tienden a colapsar debido a la presencia de una presión negativa (se auto-aspiran).



Figura 2.5: Manga flexible con anillos metálicos

- **Conductos rígidos**

Aptos para ambos modelos de ventilación, suele ser de aluminio o alguna chapa galvanizada, compuestos por la unión de tramos rectos de unos 3 metros. Son más pesados y difíciles de transportar e instalar, pero tienen una alta resistencia y un menor riesgo de colapso o posibles fisuras que provoquen fugas.



Figura 2.6: Manga rígida

2.1.5 Ventiladores

Dentro de la ventilación mecánica, los ventiladores son el componente central. Los ventiladores principales suelen instalarse en la superficie, conectados o bien a un pozo o chimenea o bien en la boca de un túnel principal, moviendo así caudales muy elevados de aire.



Figura 2.7: Ventilador en la boca de acceso

Los tipos más comunes de ventiladores empleados en minería son:

- Axiales (de hélice)
- Centrífugos (radiales)

Los ventiladores axiales cuentan con una entrada y salida de aire con la misma dirección que el eje axial del motor. Ofrecen gran caudal con incrementos moderados de presión, apropiados para minas metálicas o de poca longitud donde se requiere mover mucho aire con poca resistencia.

Existen 3 tipos básicos de ventiladores axiales:

- Helicoidales Comunes dentro de la ventilación general por mover aire con poca pérdida de carga.
- Tubulares Capaces de mover aire con resistencias moderadas.
- Turboaxiales Cuentan con un mayor rendimiento que los anteriores.



Figura 2.8: Ventilador axial PLANETFAN

Los ventiladores centrífugos, en cambio, pueden generar mayores aumentos de presión estática a costa de menores caudales, por lo que se usan típicamente en situaciones de alta resistencia (por ejemplo, minas de carbón profundas con redes extensas de galerías y estrechamientos, o donde se necesite vencer grandes pérdidas de carga). Su trayectoria del flujo es diferente a la del rodete de la salida. Cuenta diferentes tipos principales en función del tipo de rodetes:

- Con álabes curvados hacia delante Silenciosos y requieren poco espacio. Interesantes con presiones necesarias en rangos bajos-medios.
- Con álabes curvados hacia atrás Cuentan con un mayor rendimiento.
- Radiales Ideales para una ventilación localizada.



Figura 2.9: Ventilador centrífugo

Cuadro 2.1: Comparativa entre ventiladores axiales y centrífugos

Característica	Axiales (de hélice)	Centrífugos (radiales)
Dirección del flujo	Paralela al eje del motor	Perpendicular al eje del motor
Caudal vs presión	Alto caudal, baja presión	Alta presión, menor caudal
Aplicación típica	Minas metálicas, de poca longitud, con baja resistencia	Minas profundas, redes complejas o alta pérdida de carga
Subtipos	<ul style="list-style-type: none"> ■ Helicoidales: para baja pérdida de carga ■ Tubulares: para resistencias moderadas ■ Turboaxiales: mayor rendimiento 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Álabes curvados hacia delante: silenciosos, compactos, presión baja-media ■ Álabes curvados hacia atrás: mayor eficiencia ■ Radiales: ventilación localizada

La selección entre axial o centrífugo depende del punto de operación requerido (se debe tener en cuenta la combinación entre caudal y presión). En la práctica, muchas instalaciones principales utilizan ventiladores axiales de gran diámetro con palas ajustables, debido a su eficiencia dentro del rango típico de operación de minas subterráneas.

Características Técnicas y Curvas de Desempeño Estos tipos de ventilador presentan curvas características que relacionan el caudal de aire que pueden mover con la presión que generan, además de curvas de potencia y eficiencia. Entender estas curvas es fundamental para seleccionar el ventilador adecuado y operarlo eficientemente. En un gráfico típico, el eje hori-

zontal representa el caudal (Q) y el vertical la presión estática o total (P) generada. Las curvas muestran que, por lo general, a mayor caudal entregado, menor presión disponible (inversamente proporcional). El punto de operación real se determina por la intersección de la curva del ventilador con la curva del sistema (realizada tras calcular la resistencia de la mina).

- **Curvas de Ventiladores Axiales:** La curva presión-caudal de un ventilador axial inicia en caudal máximo con presión cero. A medida que disminuye el caudal (aumenta la resistencia) la presión aumenta casi linealmente hasta cierto punto máximo. Una vez superado ese punto, muchos axiales exhiben un fenómeno de pérdida de estabilidad: la presión deja de subir e incluso cae ligeramente antes de volver a aumentar, creando una “zona inestable” en la curva. En esa región el flujo de aire se vuelve turbulento, causando vibraciones, ruido excesivo y pulsaciones de aire.

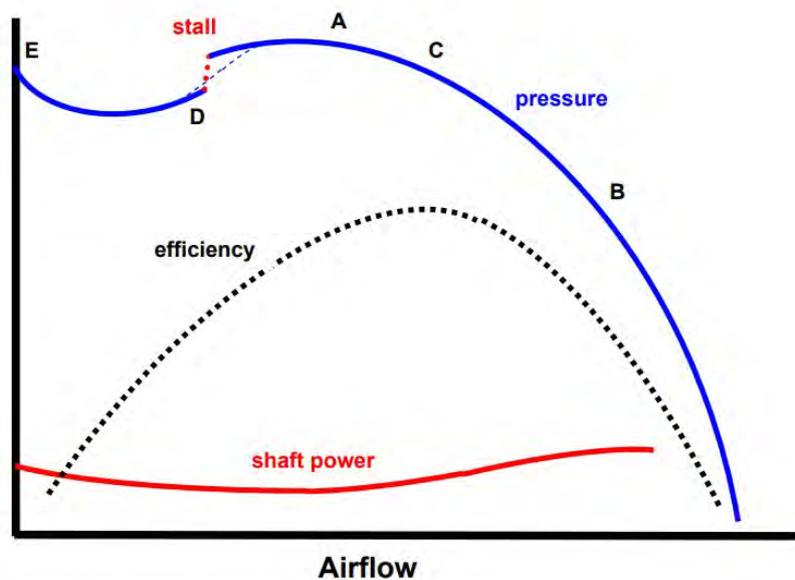


Figura 2.10: Curva característica de un ventilador axial. Fuente [15]

Los grandes axiales industriales con palas de alto desempeño reportan eficiencias de hasta un 80%. El tamaño de los axiales mineros puede variar desde portátiles de 20 cm hasta enormes rotores de 5 m de diámetro en instalaciones principales. Muchos incorporan sistemas de paso variable de álabes, permitiendo ajustar el ángulo para controlar el caudal e incluso invertir el flujo rápidamente en emergencias. Esto logra invertir el aire a 40–60% del caudal nominal en sentido contrario, útil para extraer humo o gas en caso de incendio. Los axiales suelen tener el motor acoplado directamente (accionamiento directo), simplificando su diseño.

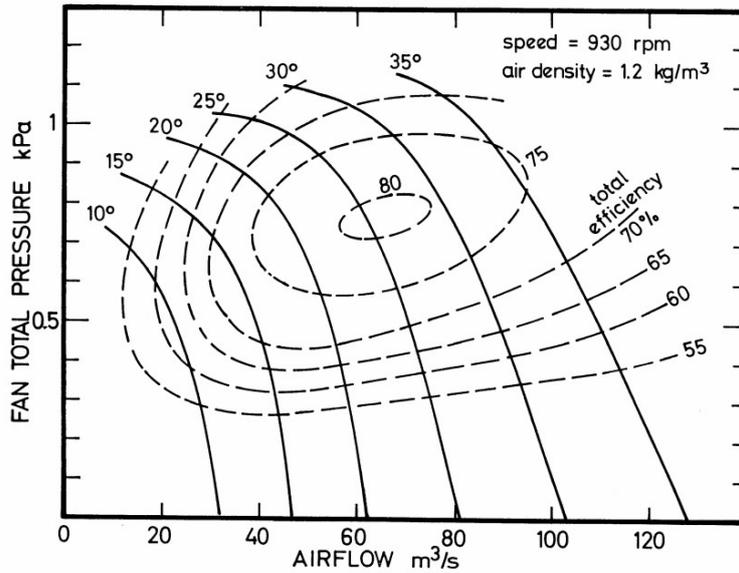


Figura 2.11: Curva de un axial con ángulo variable. Fuente [15]

Es esencial seleccionar el axial de modo que su punto de trabajo quede en la parte estable de la curva y siempre lejos de esa zona de.

- **Curvas de Ventiladores Centrífugos:** Los ventiladores centrífugos presentan una curva diferente: pueden desarrollar presión significativa incluso a caudal cero, y la presión suele aumentar a medida que el caudal disminuye, de forma más monótona y sin un colapso repentino como en el axial. Esto les permite operar en rangos de presión más altos de forma estable. Los centrífugos de álabes curvados hacia atrás se caracterizan por no sobrecargar el motor fuera del rango. Su eficiencia es muy alta, no siendo raro que sea superior al 80% en diseños industriales, siendo los más eficientes entre los ventiladores comunes. En cambio, los centrífugos de álabes curvados hacia adelante (tipo turbina “jaula de ardilla”) suelen manejar menores volúmenes, con eficiencias más moderadas (50-70%) y tienden a requerir más potencia a caudal elevado. En minería, la mayoría de ventiladores principales centrífugos usan álabes inclinados hacia atrás o radiales robustos, debido a su robustez y rendimiento elevado bajo alta presión. Su velocidad de giro puede ser alta para generar la presión requerida (muchos funcionan a 1000-1750 RPM o más, según diámetro).

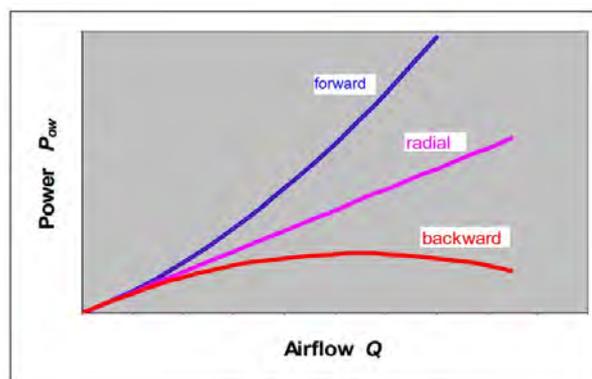


Figura 2.12: Curva potencia-caudal teórica de un centrífugo. Fuente [15]

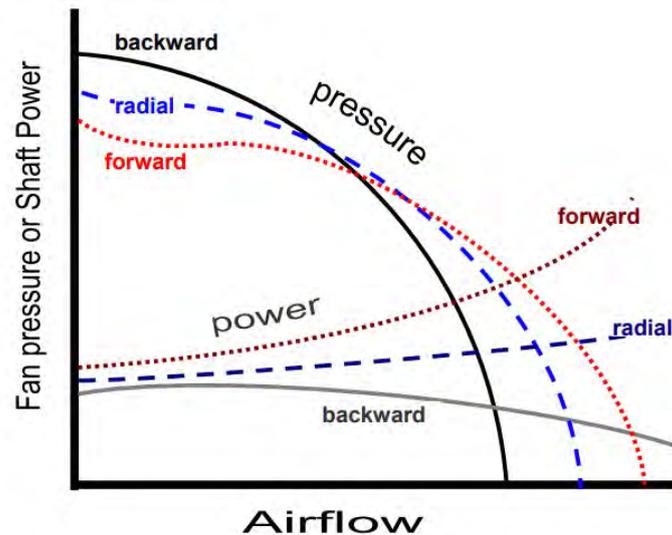


Figura 2.13: Curva potencia-caudal real de un centrífugo. Fuente [15]

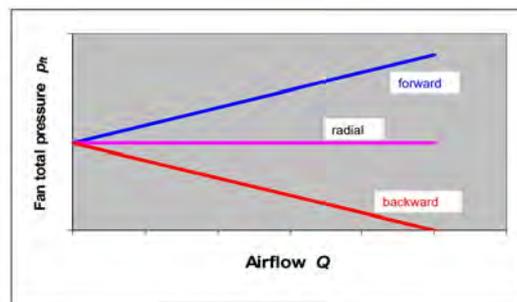


Figura 2.14: Curva presión-caudal teórica de un centrífugo. Fuente [15]

- **Curvas de Ventiladores de Flujo Mixto:** Al ser híbridos, sus curvas se ubican entre las de axiales y centrífugos. Proporcionan cierta presión adicional respecto a un axial equivalente, sin alcanzar la de un centrífugo puro. La pendiente de la curva presión-caudal es intermedia: no tan plana como la de un axial (que cae rápido en presión al aumentar caudal), ni tan empinada como la de un centrífugo de alto rendimiento. Su punto de máxima eficiencia suele ocurrir a régimen de caudal y presión intermedios. Estos ventiladores pueden operar de forma estable en un rango algo más amplio que un axial antes de entrar en pérdida, gracias a la componente centrífuga que retrasa el stall. Eficiencia: Logran eficiencias buenas, aunque ligeramente inferiores a las de un centrífugo bien diseñado; superan normalmente a axiales estándar. Son una solución de compromiso cuando se necesita montar un ventilador en línea (como un axial) pero con mayor presión disponible.

Respecto a la velocidad específica (un parámetro adimensional que relaciona caudal, presión y velocidad de giro), los centrífugos operan en valores bajos a medios – por ejemplo, un centrífugo de álabes atrás tiene velocidad específica típicamente $Ve \approx 2000$, mientras uno de álabes adelante puede tener $Ve \approx 2000-5000$, comparados con ≈ 5000 en axiales. Esto refleja su adaptación a menores caudales y mayores aumentos de presión.

Consumo y rendimiento El consumo de energía de un ventilador depende de su eficiencia y del punto de operación. Axiales y centrífugos se diferencian en que un axial suele requerir

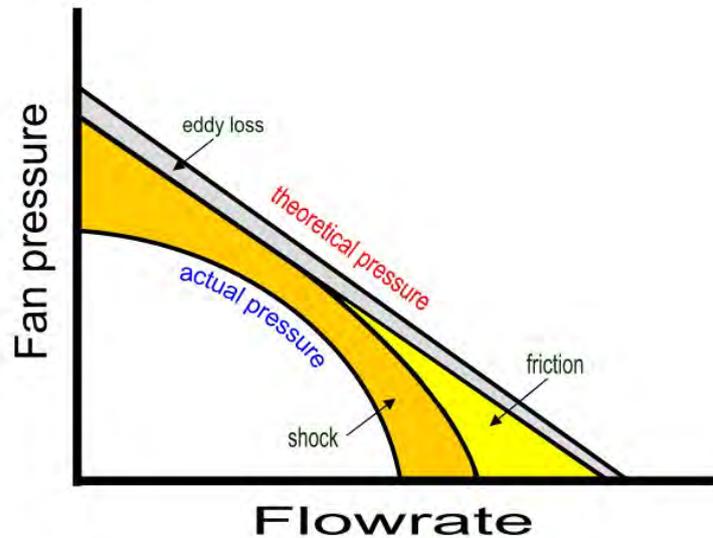


Figura 2.15: Curva presión-caudal real de un centrífugo. Fuente [15]

menos potencia para mover grandes volúmenes a baja presión, mientras que un centrífugo consume más potencia para generar presiones altas. Por ejemplo, en la práctica: un ventilador axial grande puede mover cientos de m^3/s con relativamente baja potencia si la resistencia es baja, mientras que un centrífugo de similar tamaño usaría más kW pero podría vencer resistencias mayores. Actualmente, la eficiencia energética es un punto focal: fabricantes optimizan el diseño de palas (incluso usando materiales compuestos como fibra de carbono) para mejorar el rendimiento, y se emplean motores de alta eficiencia con variadores de frecuencia (VFD) para ajustar la velocidad según la demanda de ventilación (sistemas “ventilación inteligente” o Ventilation on Demand). Todo esto apunta a reducir el costo energético, ya que la ventilación puede representar hasta 40-50 % del consumo eléctrico de una mina.

Tamaño y velocidad específica La elección axial vs centrífugo suele relacionarse con la velocidad específica necesaria. Como referencia, los ventiladores axiales tienen velocidades específicas muy altas (superiores a 5000) indicativas de máquinas de alto caudal y baja presión, mientras que los centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen velocidades bajas (inferiores a 2000, para baja velocidad y alta presión) y los de álabes hacia adelante intermedias (2000-5000). Los ventiladores mixtos caen en un rango medio-alto de N_s . Este parámetro guía al ingeniero en qué tipo de ventilador será más eficiente para una combinación dada de caudal-presión. La **velocidad específica** N_s es un parámetro que ayuda a la hora de seleccionar el tipo de ventilador más eficiente. Es un número adimensional o relativo que se calcula generalmente mediante:

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

donde:

- N es la velocidad del eje en revoluciones por minuto (rpm),
- Q es el caudal volumétrico (por ejemplo, en m^3/s),

- H es la presión o carga (en Pa o mmH₂O).

Dependiendo de las unidades usadas, N_s puede no ser completamente adimensional, pero su valor es útil como indicador comparativo entre tipos de ventiladores.

Además de ventiladores axiales y centrífugos, clasificados según la dirección de la trayectoria del aire, se pueden clasificar también:

Cuadro 2.2: Resumen de clasificación y control de ventiladores

Criterio	Clasificación / Descripción
Tipo por trayectoria del aire	<ul style="list-style-type: none"> ■ Transversal: Aire entra y sale perpendicular al eje. ■ Helicentrífugo: Mezcla axial y centrífugo; aire sigue trayectoria radial.
Presión de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Baja: hasta 70 mm c.d.a. ■ Media: 70 – 3.000 mm c.d.a. ■ Alta: más de 3.000 mm c.d.a.
Condiciones de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Estándar: Ambientes normales sin altas exigencias. ■ Especiales: <ul style="list-style-type: none"> • Hasta 150°C. • Ambientes corrosivos (acero inoxidable o polipropileno).
Control de caudal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Estrangulamiento: Mediante compuertas (manual/automático). ■ Variación de velocidad: Reguladores electrónicos o variadores de frecuencia. ■ Ángulo de álabes: Ajuste en parado o en marcha (requiere más potencia).

2.1.6 Ventiladores en serie y en paralelo

Es común también instalar ventiladores en serie o en paralelo según las necesidades:
 En serie: un ventilador se sitúa detrás de otro en el mismo conducto para sumar presiones en casos excepcionales de alta resistencia.

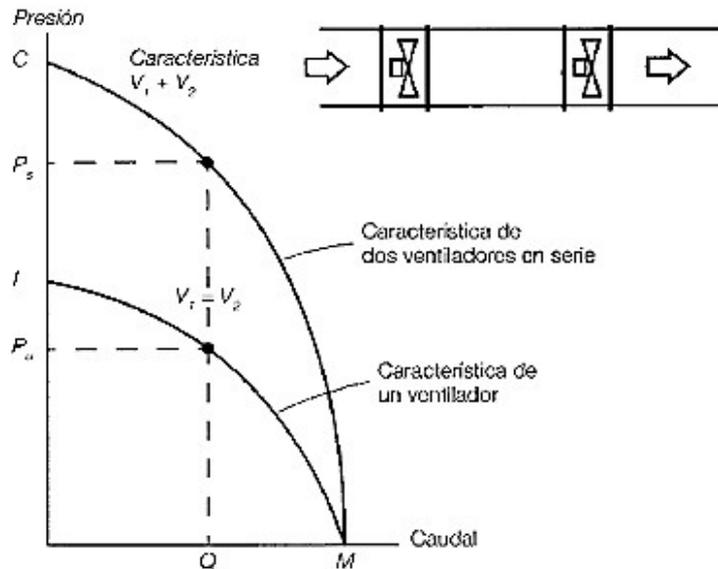


Figura 2.16: Gráfica de ventiladores en serie. Fuente: [23]

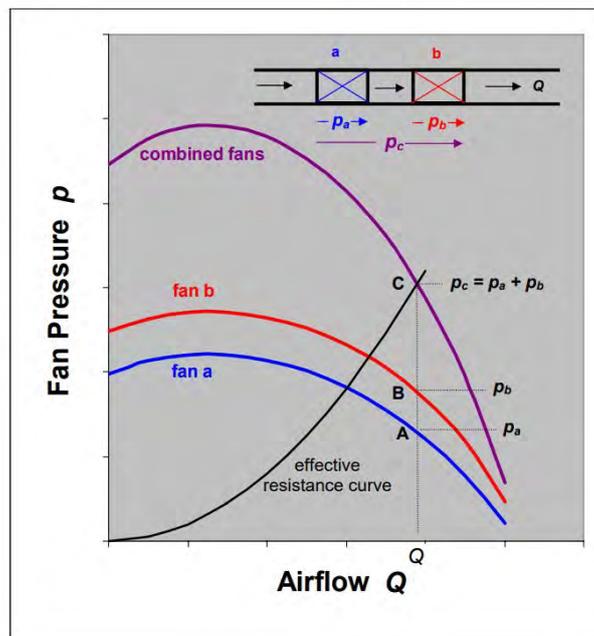


Figure 10.13 Characteristic curves for two fans connected in series.

Figura 2.17: Curva característica de ventiladores conectados en serie. Fuente [15]

En paralelo: varios ventiladores actúan uno al lado del otro en la misma cámara de aire o galería para aumentar el caudal disponible o por razones de redundancia.

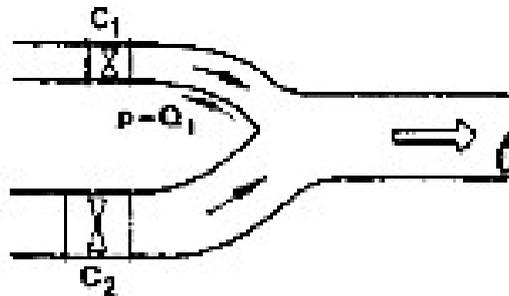


Figura 2.18: Ventiladores en paralelo

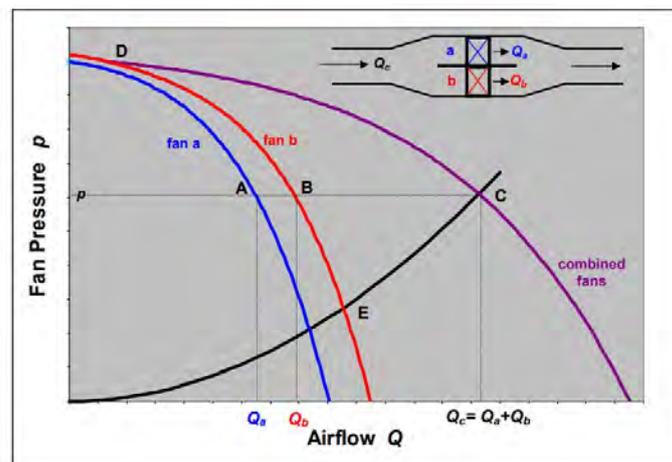


Figura 2.19: Curva característica de ventiladores conectados en paralelo. Fuente [15]

En cualquier caso, la ventilación mecánica forzada es actualmente obligatoria y forma la columna vertebral de la seguridad minera, pues garantiza la dilución de gases tóxicos, la eliminación de polvo en suspensión y el suministro de oxígeno en todas las zonas donde haya personal, siendo todos estos gran parte de los factores de riesgo más altos que se tienen en el entorno minero, ya sea directa o indirectamente.

2.1.7 Ventilación principal y secundaria

Dentro de un sistema de ventilación mecánica, se distinguen usualmente dos subsistemas: la ventilación principal o primaria y la ventilación secundaria, auxiliar o local:

La ventilación principal se refiere al circuito global de aire que atraviesa toda la mina, es decir, desde las tomas de aire fresco en superficie, recorriendo las galerías principales, hasta la salida del aire de retorno por los pozos o chimeneas de salida.

Este circuito principal está impulsado por los ventiladores principales fijos y su misión es aportar un caudal base de aire que bañe la red completa de túneles. De este flujo principal "se

desprende.^o se deriva el aire hacia los distintos frentes y áreas de trabajo mediante aperturas controladas.

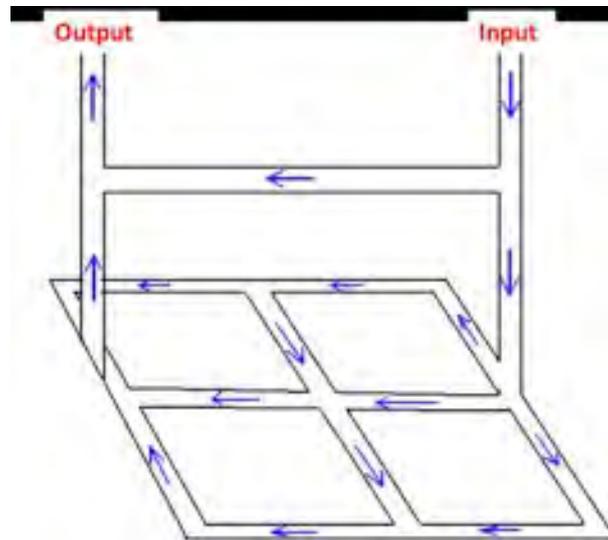


Figura 2.20: Ventilacion con entrada y salida. Fuente:[15]

Esta ventilación primaria puede presentar un problema, y es que en muchas labores subterráneas como galerías en desarrollo o frentes de avance el circuito principal por sí solo no logra llevar suficiente aire fresco, especialmente si esas labores son frentes ciegos (labores con un único acceso). Es en estos casos cuando aparece la ventilación secundaria o auxiliar, que consiste en dispositivos locales (ventiladores auxiliares y ductos) para conducir aire hasta esos frentes aislados.

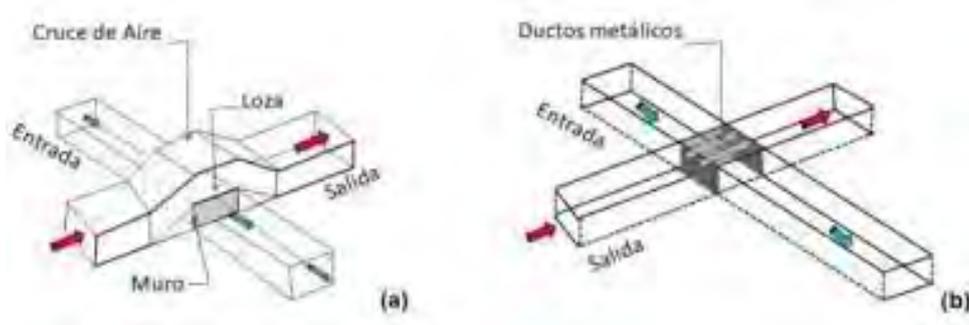


Figura 2.21: Cruces de aire

La ventilación auxiliar toma aire fresco del circuito principal, como lo puede ser el de una galería cercana y lo impulsa específicamente a la zona de trabajo a través de una red de conductos flexibles o tuberías temporales. En algunas ocasiones puede extraer el aire viciado desde el frente y expulsarlo al circuito de retorno principal.

De esta forma el sistema auxiliar puede operar de dos formas, forzante o extractiva: la forma forzante consiste en impulsar aire limpio hacia el frente, y la extractiva en aspirar aquel que este

contaminado desde el frente.

Se pueden tener así numerosas situaciones, como por ejemplo en un desarrollo largo de avance, a menudo se utiliza un ventilador auxiliar que sople aire fresco por una tubería hasta el frente, diluyendo los gases de voladura o diésel allí generados, mientras que el aire de retorno vuelve por el espacio del túnel fuera de la tubería. En cambio, en ciertas condiciones (como presencia de polvo de sílice o gases muy tóxicos en frente de desarrollo), puede preferirse un sistema aspirante local, colocando ductos que extraen el aire viciado directamente del frente y lo evacúan, mientras el aire fresco ingresa por el túnel abierto hacia el frente. Incluso existen esquemas combinados, denominados sistemas de ventilación combinada aspirante-impelente, donde se instalan dos conductos: uno inyectando aire limpio y otro simultáneamente extrayendo el aire usado, logrando así una ventilación más eficaz en frentes de gran extensión o en tareas de alto polvo.

En todos los casos, la ventilación secundaria es temporal y se va modificando conforme avanza la labor, siendo su correcto diseño y funcionamiento (evitar roturas o fugas en las mangas) crucial para garantizar condiciones respirables en zonas que de otra forma quedarían mal ventiladas.

Es muy importante entender de todo esto que la ventilación secundaria se alimenta del circuito principal; por tanto, la capacidad de este último (caudal, presión) debe ser suficiente para proveer aire a las derivaciones auxiliares sin desatender el flujo general de la mina.

Los ventiladores auxiliares o secundarios son típicamente más pequeños y portátiles que los principales. Suelen ser ventiladores axiales de alta velocidad (y a veces de tipo turbina o sopladores portátiles), diseñados para mover aire a través de conductos relativamente estrechos con pérdidas de carga apreciables. Por seguridad, estos ventiladores auxiliares se ubican lo más cerca posible de la fuente de aire fresco impulsando aire por el conducto hacia el fondo. De este modo el ventilador opera en aire limpio y se minimiza la longitud de impulsión. Si operaran extrayendo aire viciado, se coloca el ventilador al inicio del ducto pero aspirando desde el frente. Esta ventilación auxiliar, al ser localizada, se enciende o apaga según la necesidad del trabajo en ese frente, a diferencia de la ventilación principal que suele operar continuamente.

2.1.8 Reguladores de aire y puertas de ventilación

Además de ventiladores, un sistema de ventilación subterránea se apoya en varios elementos de control de flujo, principalmente los reguladores y las puertas.

Los reguladores de aire son aberturas controladas dispuestas en las intersecciones o paredes de las galerías, cuya función es restringir o desviar el flujo de aire según conveniencia para balancear la distribución dentro de la red minera. Al agregar resistencia en ciertos ramales mediante un regulador se consigue reducir el caudal por ese camino y forzar más aire hacia otras zonas que lo requieran. Son, en esencia, válvulas pasivas que permiten gestionar cómo se reparte el flujo en la mina sin cambiar la potencia de los ventiladores. Pueden ser desde simples bastidores de madera u hojas metálicas deslizables hasta sofisticados reguladores automatizados motorizados, capaces de abrirse o cerrarse según órdenes remotas para ajustar la ventilación. De hecho, tradicionalmente los reguladores eran estáticos, pero hoy se dispone de modelos motorizados que forman parte de sistemas de Ventilación a Demanda (VoD, que se desarrollará

posteriormente) y control inteligente, funcionando de una forma u otra en función de las condiciones cambiantes de la mina.

Por su parte, las puertas de ventilación son estructuras tipo portón o compuerta grande colocadas en túneles o secciones clave para sellar el paso de aire cuando es necesario. Se utilizan,



Figura 2.22: Compuerta de ventilación de MDM

por ejemplo, en entradas de ramales inactivos o entre la vía principal de ingreso y retorno para evitar cortocircuitos del aire. A diferencia de los reguladores, las puertas suelen diseñarse para permitir el tráfico de equipos o personas cuando se abren, pero cuando están cerradas actúan como paredes que fuerzan al aire a seguir el camino deseado. Un caso típico es la puerta instalada en galerías de transporte para separar la corriente de aire fresco de la de retorno en minas con sistema aspirante: la puerta permanece cerrada y solo se abre temporalmente para el paso de vehículos, tras lo cual se cierra automáticamente para no comprometer la separación de flujos. Las puertas de ventilación modernas a menudo cuentan con mecanismos de cierre automático (muelles, contrapesos o actuadores) para garantizar que no queden inadvertidamente abiertas, evitando de esta forma la pérdida de aire por rutas no deseadas o la recirculación. En resumen, reguladores y puertas son elementos pasivos indispensables en la red de ventilación: los primeros gradúan y distribuyen el caudal en la red, mientras las segundas aíslan circuitos y previenen la fuga o mezcla de corrientes de aire, tratando siempre de hacer que el flujo necesario llegue al lugar deseado. En la actualidad, la tendencia es integrar estos componentes al control remoto y automatizado, reemplazando reguladores manuales por modelos motorizados, permitiendo que la ventilación se controle de un forma centralizada y eficiente, buscando siempre la mayor seguridad.

2.1.9 Pozos y chimeneas

Los pozos de ventilación y chimeneas son las estructuras normalmente verticales, aunque pueden aparecer inclinadas que conectan la mina con la superficie o comunican distintos niveles subterráneos, sirviendo como conductos principales para la entrada o salida del aire.

Por lo general, toda mina subterránea debe contar con al menos dos aberturas o accesos separados que puedan hacer de toma y retorno de aire. Estos accesos pueden ser diferentes combinaciones: un par de pozos, un pozo y un socavón, dos socavones a distinta altura... , de forma



Figura 2.23: Pozo con ventilación

que se pueda establecer un circuito completo.

Un pozo o shaft suele referirse a una excavación vertical de gran sección que llega a superficie. Puede usarse como pozo de entrada de aire (llamado pozo de admisión o downcast) o como pozo de retorno (pozo de extracción o upcast), dependiendo de, si como se ha visto, entrega aire fresco a la mina o extrae el aire viciado hacia el exterior. En algunos casos, un mismo pozo se subdivide con tabiques internos para cumplir ambas funciones, aunque lo más habitual es destinar pozos separados para cada flujo, evitando contaminaciones.



Figura 2.24: Castillete y pozo de la mina de Reocin

Las chimeneas son semejantes a los pozos, pero normalmente excavadas desde abajo hacia arriba entre niveles de la mina sin llegar a salir a la superficie.

Se usan para comunicar galerías de distinto nivel y facilitar el flujo de aire entre ellas. Por ejemplo, se puede desarrollar una chimenea de ventilación para conectar una galería inferior con otra superior que empalma a un pozo, creando así un camino de retorno del aire.

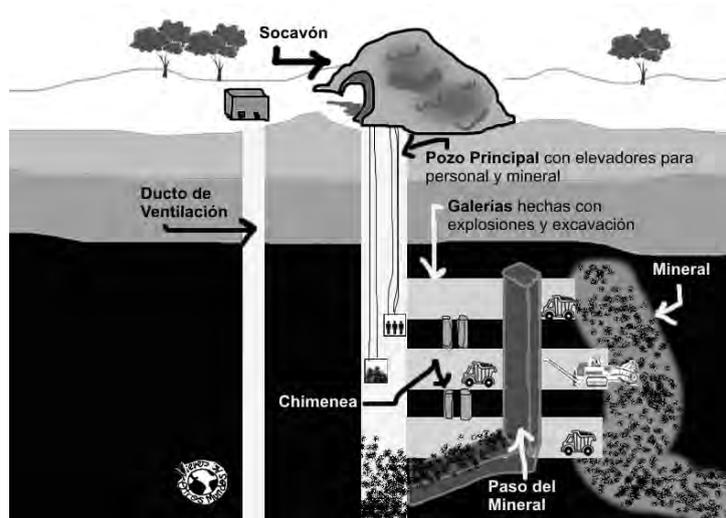


Figura 2.25: Esquema donde se ve una chimenea. Fuente:[18]

Tanto pozos como chimeneas suelen equiparse con infraestructura de ventilación. Así, en la boca de los pozos se instalan los ventiladores principales (especialmente en el pozo de retorno en sistemas aspirantes, extrayendo el aire por allí). Asimismo, en la superficie los pozos de ven-



Figura 2.26: Ventilador principal en la boca de un pozo

tilación pueden llevar torres o deflectores que protegen las entradas de aire de la intemperie o que ayudan a dirigir el aire expulsado lejos del área de trabajo. Estructuralmente, las chimeneas internas a veces incorporan ventiladores secundarios cuando se requiere impulsar el flujo a lo largo de grandes distancias verticales o aislar circuitos por nivel. No obstante, estos ventiladores de refuerzo deben emplearse con cuidado para no descompensar el circuito (idealmente operan en serie con el ventilador principal).

En definitiva, los pozos y chimeneas constituyen la columna vertebral física de la ventilación, permitiendo que cualquier punto de la mina se conecte en última instancia con la superficie para renovar su atmósfera. Su ubicación y número son decisiones de diseño de gran importancia, como por ejemplo donde ubicar tomas de aire en áreas limpias (lejos de fuentes de contaminación externa) y chimeneas de retorno donde puedan dispersar con seguridad gases potencialmente tóxicos o explosivos que salen de la mina.

Además, dado que la eficiencia de la ventilación está relacionada con la diferencia de densidad y presión entre las columnas de aire en los pozos (principio explicado en la ventilación natural), la disposición de pozos puede influir en la generación de corrientes naturales auxiliares, aunque controladas finalmente por los ventiladores.

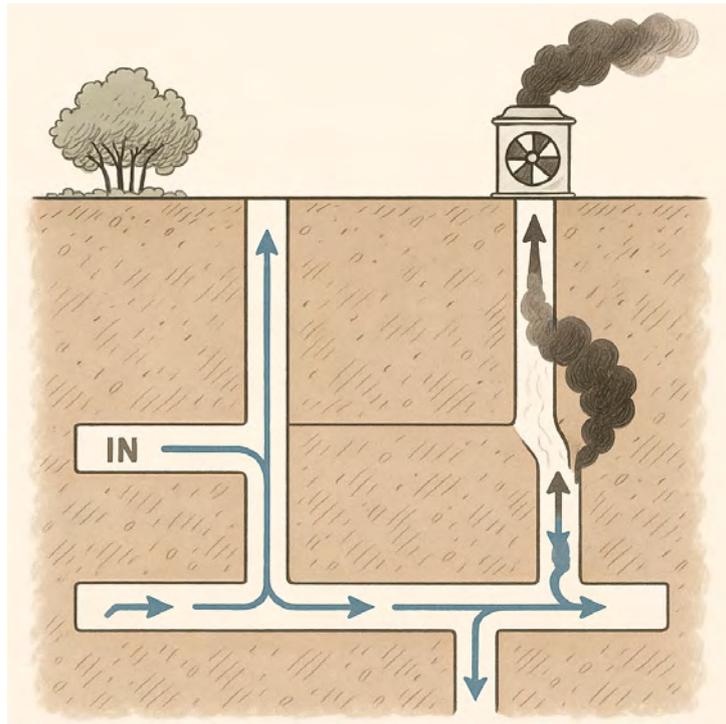


Figura 2.27: Representación de los dos accesos

2.1.10 Redes de conductos, difusores y sistemas de extracción de polvo.

Complementando la infraestructura principal (pozos, galerías y ventiladores), la ventilación subterránea utiliza redes de conductos y otros accesorios para ventilar zonas específicas y manejar contaminantes particulares, como el polvo.

Las redes de conductos suelen ser los ductos utilizados en la ventilación auxiliar ya descrita. Estos ductos suelen ser mangueras flexibles de material plástico o lona con aros, dado que son fáciles de extender y de cambiar de lugar conforme avanza la labor.



Figura 2.28: Ducto flexible

Los diámetros típicos de estos conductos oscilan entre 0.45m a 1.2m, y dependen directamente

del caudal requerido y la distancia a ventilar. De este modo, a mayor longitud de avance, mayor diámetro requerido para así reducir la caída de presión por fricción.

En la boca o extremo de salida de estos ductos se instalan a veces difusores o boquillas de distribución: se trata de secciones ensanchadas o rejillas especiales que permiten que el aire salga en un frente más amplio y con menor velocidad, mejorando la dispersión del aire fresco en el frente de trabajo y reduciendo la turbulencia excesiva.



Figura 2.29: Difusor

Un difusor bien diseñado evita que el chorro de aire impacte directamente sobre el frente o sobre los trabajadores de manera incómoda, distribuyendo el aire de forma más uniforme en el espacio de la labor. En sistemas auxiliares aspirantes se usa lo que sería el análogo al difusor, un colector o capucha de aspiración en el frente, diseñado para capturar eficientemente el polvo y gases lo más cerca posible de su fuente antes de que se dispersen por la labor.

2.1.11 El polvo

Hay un gran consenso en que el problema que supone el polvo suspendido. Por ejemplo, según CDT [6], es uno de los contaminantes más desafiantes en minas subterráneas, particularmente en operaciones de perforación, voladura y carga de material.

Los sistemas de ventilación actuales abordan el problema del polvo de varias formas: en primer lugar mediante la dilución y renovación continua del aire, tratando así de mantener la concentración de partículas por debajo de los límites permisible según la legislación.

En segundo lugar se emplean sistemas de extracción de polvo dedicados en puntos críticos.

Por último se toman, en caso de ser necesarias, medidas de supresión de polvo, como lo puede ser el riego con agua).

Un típico sistema de extracción de polvo local consiste en un ventilador extractor conectado a un conducto que aspira aire con polvo desde el foco de generación y lo conduce a un filtro o colector de polvo. Estos colectores pueden estar equipados con filtros de mangas, ciclones u otros mecanismos que retienen las partículas y devuelven aire más limpio al ambiente o al exterior. Por ejemplo, en la excavación de túneles con tuneladoras es común tener scrubbers (lavadores



Figura 2.30: Colector de polvo



Figura 2.31: Polvo y otras partículas

de aire) o colectores portátiles que limpian el aire cargado de polvo antes de recircularlo.

Algunos sistemas más especializados emplean dobles ductos: mientras un ducto principal lleva aire fresco a la frente, un ducto paralelo extrae de forma activa el aire polvoriento, formando un sistema combinado aspirante-impelente ya mencionado y logrando un control superior del polvo y de gases tóxicos en zonas de desarrollo.

2.1.12 Métodos de cálculo y software

En cuanto al diseño y análisis de los circuitos de ventilación subterránea, estos requieren métodos de cálculo especializados, ya que no dejan de ser una red análoga a un circuito complejo con múltiples rutas en paralelo y en serie donde se deben equilibrar tanto los caudales como las presiones.



Figura 2.32: Riego con agua para mitigar el polvo



Figura 2.33: Scrubber

Tradicionalmente, se aplican principios de mecánica de fluidos y leyes de conservación adap-

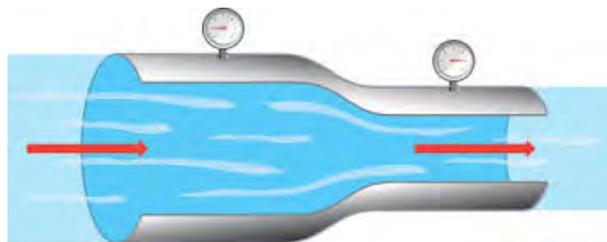


Figura 2.34: Mecánica de fluidos

tadas a la ventilación de minas. Una de las expresiones más utilizadas es la ecuación de Darcy-Weisbach (Eq (2.1)).

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.1)$$

donde:

- ΔP [Pa]: pérdida de presión a lo largo del conducto
- f [adimensional]: factor de fricción
- L [m]: longitud del conducto

- D [m]: diámetro hidráulico del conducto
- ρ [kg/m³]: densidad del aire
- v [m/s]: velocidad media del aire

Otra forma simplificada y específica para ventilación minera es la ecuación de Atkinson (Eq (2.2)).

$$\Delta P = R \cdot Q^2 \quad (2.2)$$

donde:

- ΔP [Pa]: pérdida de presión
- R [Ns²/m]: resistencia Atkinson del tramo
- Q [m³/s]: caudal volumétrico de aire

se usa para calcular las pérdidas de presión por fricción en cada labor o conducto, en función de diversos parámetros como el caudal de aire, la geometría de la labor o el coeficiente de fricción característico de la rugosidad de las paredes. Paralelamente, se consideran pérdidas de presión singulares (como cambios de sección, curvaturas, presencia de puertas, etc.), llamadas también "pérdidas por shock".

A la hora de hacer los cálculos, se hace una analogía con la electricidad: El método de los nudos es un enfoque clásico: trata los cruces de galerías como nudos donde se conserva el flujo (se tiene, por tanto, la siguiente igualdad que se ha de cumplir: suma de caudales entrantes = suma de salientes). Por otro lado, las galerías son tratadas como ramas con cierta resistencia al flujo.

Las leyes de Kirchhoff, originalmente formuladas para circuitos eléctricos, pueden aplicarse por analogía al análisis de redes de ventilación minera. Se busca conocer los caudales de aire y las pérdidas de presión en una red compleja de galerías y pozos.

Analogía entre Electricidad y Ventilación

Electricidad	Símbolo	Ventilación
Corriente	I	Caudal de aire Q
Voltaje / caída de tensión	V	Pérdida de presión ΔP
Resistencia eléctrica	R	Resistencia Atkinson R

Primera Ley de Kirchhoff (Ley de Nudos) La suma de los caudales que entran y salen en un nodo es cero (Eq 2.3).

$$\sum Q_i = 0 \quad (2.3)$$

Esto refleja el principio de conservación de la masa de aire: el aire que entra a un nodo debe salir por otro(s), sin acumulación.

Segunda Ley de Kirchhoff (Ley de Mallas) En cualquier lazo cerrado de la red (una malla), la suma de las pérdidas de presión es igual a cero (Eq 2.4).

$$\sum \Delta P_i = 0 \Rightarrow \sum R_i Q_i |Q_i| = 0 \quad (2.4)$$

Aquí, Q_i es el caudal en la rama i , y el término $Q_i |Q_i|$ asegura el signo correcto según el sentido de circulación del aire.

De esta forma se puede optimizar la distribución del aire, evaluar el balance de presiones y formular sistemas de ecuaciones para hallar caudales desconocidos (lo que en electrotecnia sería hallar intensidades).

Inicialmente esto se hacía a mano mediante métodos iterativos, pero desde hace décadas se emplean herramientas computacionales.

Hoy en día, el software de simulación de ventilación es parte integral de la metodología de diseño: permite modelar la red de galerías, pozos, resistencias, ventiladores y demás componentes, para calcular flujos y presiones en cada segmento, así como estimar la distribución de gases, temperaturas, etc. Son numerosos los programas destacables dentro de este sector, donde se pueden mencionar Ventsim DESIGN, VUMA... Estos programas los cuales ofrecen interfaces gráficas en 2D/3D para construir el modelo de la mina.

En particular, Ventsim aparece como uno de los más utilizados a nivel mundial.



Figura 2.35: Logo de Ventsim

Se trata de un paquete completo que permite diseñar y probar circuitos de ventilación incluyendo flujo de aire, presión, calor, gases, ventilación en caso de incendio...

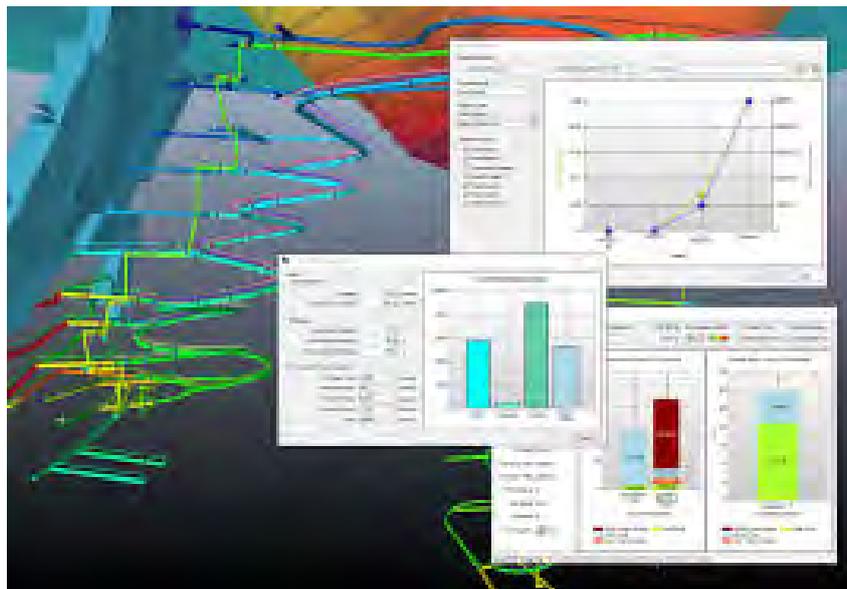


Figura 2.36: Interfaz del programa Ventsim

Estas herramientas no solo calculan la ventilación en estado estacionario, sino que algunas simulan condiciones transitorias, como una dispersión de gases tras una voladura o una evacuación de humos de incendio, y ayudan a dimensionar equipos.

Además, muchos de los softwares modernos incorporan módulos de optimización y economía, de forma que el ingeniero puede probar diferentes configuraciones de ventiladores, ubicaciones de reguladores o incluso evaluar el impacto de usar ventilación escalonada por secciones, optimizando así el balance entre seguridad y consumo de energía, que no deja de ser su labor principal.

Si ya en el pasado habrían sido de mucha ayuda e interés estos programas, hoy en día, y debido a los grandes avances y a la complejidad de las minas, es prácticamente indispensable poseer de estas herramientas. El análisis manual difícilmente puede abarcar redes con multitud de ramificaciones y condiciones variables de una forma óptima. Es por ello que la evolución de la ventilación parte de un uso intensivo de la simulación numérica y los cálculos computacionales.

Otro campo de apoyo es la dinámica de fluidos computacional (CFD), empleada en estudios específicos donde se requiere un detalle mayor localmente que el que brinda el modelo de red. Sin embargo, el cálculo de redes mediante software dedicado sigue siendo la piedra angular en

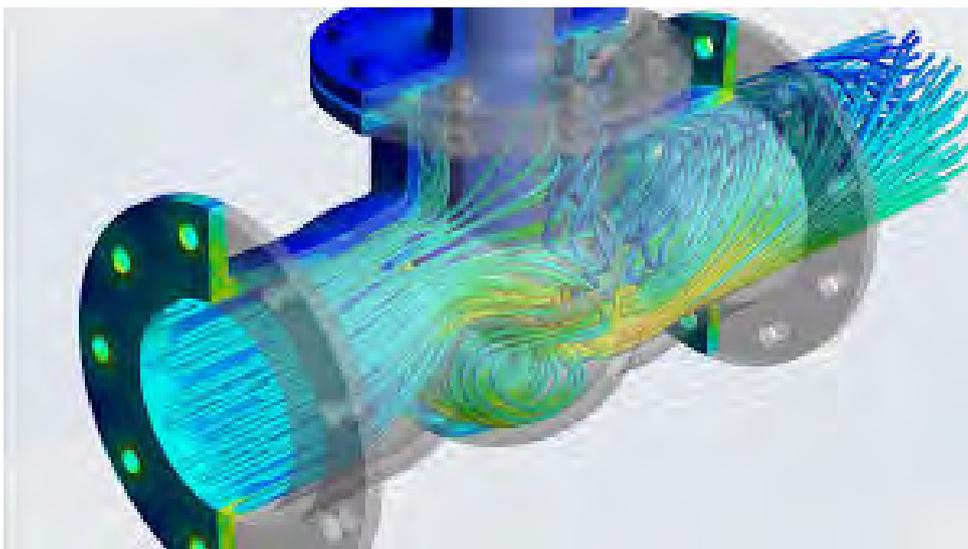


Figura 2.37: Dinámica Computacional de Fluidos

el diseño y planificación de la ventilación minera, complementado con mediciones in situ para calibrar los modelos.

En la práctica profesional los planes de ventilación de una mina han de incluir cálculos detallados de la cantidad necesaria de caudal, y luego se emplea el software para definir todos los parámetros necesarios: el tamaño de ventiladores principales, la potencia necesaria, la ubicación y grado de apertura de reguladores, hasta lograr cumplir con las exigencias impuestas por la normativa de calidad de aire en el entorno de trabajo.

Cabe destacar que, softwares como Ventisim, permiten exportar archivos creados en otros programas (como puede ser AutoCAD) a su extensión utilizada dxf. De esta forma, si se dispone del modelo del interior de la mina que se ha de diseñar y dimensionar, se podrá hacer una simple

exportación para poder tener el modelo 3D como referencia.

2.2 DISEÑO DE LA VENTILACIÓN

El diseño de un sistema de ventilación subterránea comienza por determinar los requerimientos de aire de la mina en función de sus características y operaciones. Esto implica calcular el caudal de aire fresco necesario para cada zona, de modo que se diluyan los contaminantes por debajo de límites permisibles y se provea oxígeno suficiente para las personas.

Para ello hay que tener en cuenta una serie de factores clave, como lo son:

- La cantidad de trabajadores simultáneamente en cada frente.
- La maquinaria diésel operando, que genera gases como NO_x, CO, partículas y calor.
- La emisión de gases naturales del macizo rocoso (por ejemplo, grisú o radón en ciertos minerales).
- La producción de polvo en las operaciones (perforación, arranque, transporte).
- La carga térmica: temperatura geotérmica y calor liberado por equipos.

A partir de estos factores, y apoyándose en las normativas a seguir, se calcula un caudal mínimo.

Se deben, también, asegurar velocidades del aire dentro de ciertos rangos: han de ser suficientemente altas para barrer contaminantes (generalmente se busca una velocidad mayor 0.3–0.5 m/s en frentes y galerías de trabajo), pero no tan altas que levanten polvo o sean molestia (en España, por ejemplo, no deben superar los 8 m/s), según la ITC 04.7.01, desarrollada en el capítulo 3.3 .

Una vez establecidos los requerimientos, se procede al diseño del circuito principal: se decide por dónde ingresará el aire y por dónde saldrá, así como el sentido de circulación en las principales rampas y galerías. Se debe garantizar, mediante la disposición de tabiques, puertas y cortinas en las intersecciones, que el aire fresco y el viciado no se mezclen hasta llegar al punto previsto de unión, que debe ser hacia la salida de estos. Por tanto, en esta etapa del diseño se configuran las divisiones de circuito: qué secciones de la mina estarán dentro del recorrido de aire limpio y cuáles en el de aire de retorno, instalando las separaciones necesarias.

Posteriormente se dimensionan los ventiladores principales. Empleando los métodos de cálculo mencionados o software, se evalúa la resistencia total del circuito principal, que depende de la longitud y sección de las galerías, rugosidades, número de frentes auxiliares ventilados. . . . Ello permite obtener la curva característica de la red (caída de presión vs. caudal).

Luego se selecciona un ventilador o combinación de ventiladores cuya curva de rendimiento pueda superar esa resistencia al caudal requerido. La intersección entre la curva de la red y la del ventilador da el punto de operación esperado.

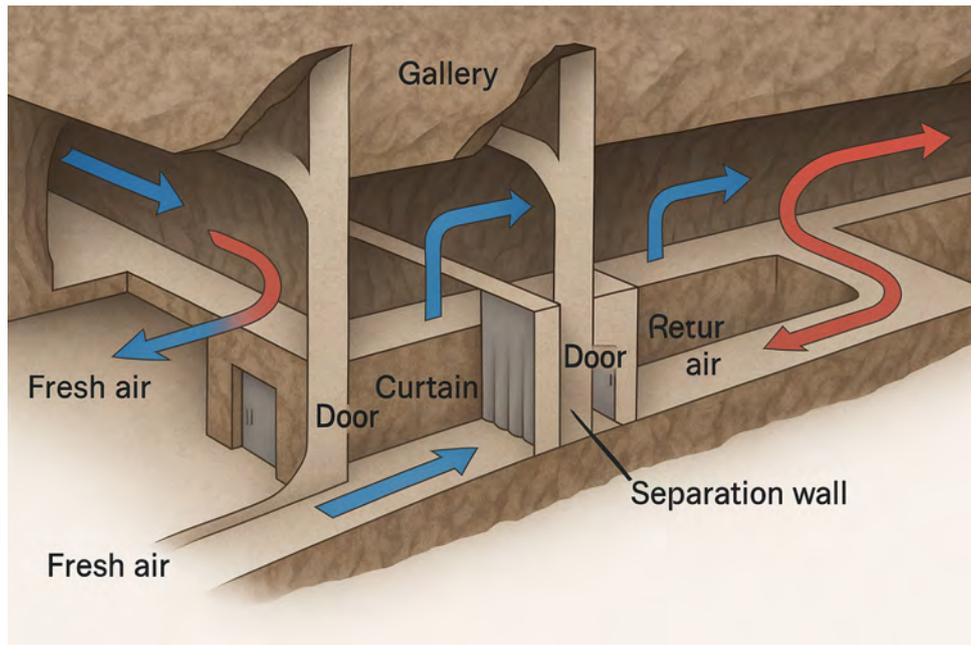


Figura 2.38: Diseño del sentido de circulación

El ingeniero de ventilación debe asegurarse de que ese punto cumple con el caudal mínimo exigido, con algo de margen para compensar posibles incrementos de resistencia (como puede suceder a medida que la mina se profundiza o si se añaden nuevas galerías).

Si la curva de un solo ventilador no es suficiente, se consideran ventiladores adicionales: en paralelo si se requiere más caudal (manteniendo presión similar) o en serie si se necesita más presión (aunque esta última configuración es menos común debido a la dificultad de operar ventiladores en línea). Además, se decide la ubicación: muchos diseños colocan ventiladores principales en superficie (por facilidad de mantenimiento y acceso), ya sea en boca de pozo o de galería; otros los sitúan en el subsuelo, por ejemplo en una cámara cerca de la salida de aire, para reducir el recorrido de aire de alta presión.

También se define si los ventiladores operarán en impulsión o extracción según la estrategia escogida. Este diseño de ventiladores principales considera no solo operación normal, sino también contingencias: es deseable prever redundancias o sistemas de respaldo por seguridad. Por ejemplo, instalaciones críticas pueden contar con ventiladores de reserva que se activan si falla el principal, o con motores de velocidad variable para adaptar el flujo a condiciones anómalas como lo puede ser un incendio.

Otro aspecto del diseño es la ventilación auxiliar para cada desarrollo planificado. Se debe dimensionar el diámetro y longitud de ductos y la capacidad de los ventiladores secundarios necesarios para enviar aire a frentes de trabajo. Aquí se aplica de nuevo el cálculo de pérdidas, donde por cada 100 m de conducto se calcula la caída de presión, y con base en el caudal requerido en el frente se selecciona un ventilador auxiliar capaz de vencer esa pérdida. Como prácticamente en la totalidad de las labores de ingeniería, se incluyen factores de seguridad por posibles fallos o situaciones que se puedan dar.

Como se describe en el capítulo 5 de McPherson [mcperson], las pérdidas de carga en sistemas de ventilación subterránea pueden dividirse en pérdidas por fricción y pérdidas por choque, estas últimas generadas por elementos como codos o bifurcaciones. Este capítulo es una gran guía sobre cómo calcular las pérdidas de forma detallada.

	Friction factor, k kg/m ³	Coefficient of friction, f (dimensionless)
Rectangular Airways		
Smooth concrete lined	0.004	0.0067
Shotcrete	0.0055	0.0092
Unlined with minor irregularities only	0.009	0.015
Girders on masonry or concrete walls	0.0095	0.0158
Unlined, typical conditions no major irregularities	0.012	0.020
Unlined, irregular sides	0.014	0.023
Unlined, rough or irregular conditions	0.016	0.027
Girders on side props	0.019	0.032
Drift with rough sides, stepped floor, handrails	0.04	0.067
Steel Arched Airways		
Smooth concrete all round	0.004	0.0067
Bricked between arches all round	0.006	0.01
Concrete slabs or timber lagging between flanges all round	0.0075	0.0125
Slabs or timber lagging between flanges to spring	0.009	0.015
Lagged behind arches	0.012	0.020
Arches poorly aligned, rough conditions	0.016	0.027
Metal Mines		
Arch-shaped level drifts, rock bolts and mesh	0.010	0.017
Arch-shaped ramps, rock bolts and mesh	0.014	0.023
Rectangular raise, untimbered, rock bolts and mesh	0.013	0.022
Bored raise	0.005	0.008
Beltway	0.014	0.023
TBM drift	0.0045	0.0075
Coal Mines: Rectangular entries, roof-bolted		
Intakes, clean conditions	0.009	0.015
Returns, some irregularities/ sloughing	0.01	0.017
Belt entries	0.005 to 0.011	0.0083 to 0.018
Cribbed entries	0.05 to 0.14	0.08 to 0.23
Shafts¹		
Smooth lined, unobstructed	0.003	0.005
Brick lined, unobstructed	0.004	0.0067
Concrete lined, rope guides, pipe fittings	0.0065	0.0108
Brick lined, rope guides, pipe fittings	0.0075	0.0125
Unlined, well trimmed surface	0.01	0.0167
Unlined, major irregularities removed	0.012	0.020
Unlined, mesh bolted	0.0140	0.023
Tubbing lined, no fittings	0.007 to 0.014	0.0012 to 0.023
Brick lined, two sides buntons	0.018	0.030
Two side buntons, each with a tie girder	0.022	0.037
Longwall faceline with steel conveyor and powered supports²		
Good conditions, smooth wall	0.035	0.058
Typical conditions, coal on conveyor	0.05	0.083
Rough conditions, uneven faceline	0.065	0.108
Ventilation ducting³		
Collapsible fabric ducting (forcing systems only)	0.0037	0.0062
Flexible ducting with fully stretched spiral spring reinforcement	0.011	0.018
Fibreglass	0.0024	0.0040
Spiral wound galvanized steel	0.0021	0.0035

Figura 2.39: Valores estimados de pérdida de carga. Extraído de [15]

El diseño también establece procedimientos, como que el extremo del ducto se mantenga a una distancia máxima del frente (típicamente no más de 10–15 m para garantizar renovación efectiva en el frente) y que tras cada voladura se ventile suficientemente antes de reingresar personal.

El balance de distribución de aire es otro elemento de diseño. Con los caudales requeridos por zona y el caudal total proporcionado por los ventiladores, el ingeniero asigna flujos a cada sector de la mina. Esto se logra ajustando secciones de paso y colocando reguladores donde se necesite restringir flujos excesivos. Por ejemplo, si dos galerías en paralelo conectan la entrada con el retorno y una de ellas necesita menos aire (por tener menos actividad), se instalará un regulador parcial en esa rama para forzar mayor proporción de caudal por la otra rama más demandante. Mediante la simulación en software, se va iterando la apertura de estos reguladores hasta que cada zona recibe aproximadamente su caudal objetivo.

Estos valores se documentan en el plan de ventilación, indicando configuraciones de reguladores y posiciones de puertas. El plan de ventilación también aborda el control de fugas: inevitablemente habrá flujos parásitos a través de puertas mal cerradas, filtraciones entre galerías adyacentes, etc. El diseñador intenta minimizarlas situando sellos y garantizando buen estado de las infraestructuras.

Además de todo esto, el diseño de ventilación debe contemplar, como se ha mencionado antes, la expansión futura de la mina. A medida que la mina crece en profundidad o extensión lateral, los requerimientos de aire aumentarán. Por ello, se proyecta si los ventiladores actuales podrán atender fases futuras o si se necesitarán refuerzos, ya sean ventiladores adicionales o cambios de modelo. Un diseño de calidad suele incluir márgenes y la posibilidad de modular, como usar ventiladores de velocidad variable que puedan aumentar su rendimiento más adelante, o prever la instalación de un segundo ventilador en paralelo cuando se alcance cierto avance. De manera análoga, se planifican nuevos pozos o chimeneas de ventilación si la longitud de los circuitos excederá lo recomendable.

En minas de gran envergadura, es común tener fases donde se abre un segundo pozo de retorno cuando el primero llega al límite de caudal manejable, o se interconectan niveles con nuevas chimeneas para aliviar la circulación de aire.

Otro componente del diseño es considerar escenarios de emergencia. Por ejemplo, en caso de un incendio subterráneo, se define cómo se evacuarán los humos. A veces incluso se instalan ventiladores reversibles (que pueden invertir el flujo) para responder a ciertas contingencias. También se diseña la ventilación de socorro en refugios de emergencia (lugares donde se puede suministrar aire seguro a personas atrapadas).



Figura 2.40: Pozos de emergencia

Finalmente, tras definir el diseño, se implementa un programa de monitoreo y mantenimiento. A lo largo de la mina habrá puntos donde regularmente se medirán caudales, velocidades, presiones y calidad del aire para asegurar que el sistema funcione según lo planeado.

En resumen, el diseño de ventilación subterránea combina cálculo de requerimientos, configuración de circuitos (pозos, galerías, divisiones), selección de equipos (ventiladores principales y auxiliares), balance de distribución mediante reguladores/puertas, previsión de crecimiento futuro y consideraciones de emergencia. Todo apoyado fuertemente en herramientas computacionales de modelado de flujo y en la experiencia y normativas que guían los criterios a seguir. El resultado final es un sistema que, si está bien concebido, provee a cada área de la mina el aire

necesario para operar de forma segura y eficiente.

2.3 PROBLEMAS ABORDADOS POR LAS TECNOLOGÍAS Y RETOS PENDIENTES

Las tecnologías actuales de ventilación subterránea han logrado resolver o mitigar muchos de los problemas tradicionales asociados a trabajar bajo tierra. En primer lugar, garantizan una atmósfera respirable, aportando oxígeno suficiente y expulsando acumulaciones de gases tóxicos o asfixiantes.

La ventilación forzada diluye gases como el CO, CO₂, NO_x de los equipos diésel, el humo de las voladuras, así como gases naturales del macizo (metano, sulfuros de hidrógeno, radón, etc.), manteniéndolos por debajo de los límites legales de exposición. Esto ha contribuido enormemente a la seguridad minera, reduciendo la incidencia de asfixias, intoxicaciones y explosiones por gas.

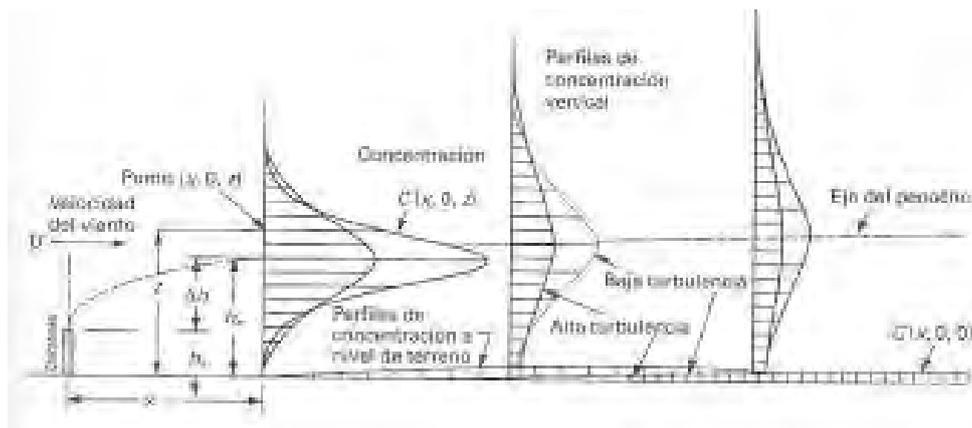


Figura 2.41: Modelo de dispersión de contaminantes

Asimismo, el flujo de aire continuo controla la temperatura y humedad en las profundidades: sin ventilación, el calor geotérmico y el generado y disipado por motores y rozamiento elevarían rápidamente la temperatura a niveles intolerables.

Otro logro es el control del polvo en suspensión, que si bien no se elimina completamente solo con ventilación, ésta reduce la concentración de polvo respirable, disminuyendo enfermedades pulmonares ocupacionales. En esencia, las técnicas actuales abordan el problema fundamental de proveer un entorno habitable en el subsuelo, algo imprescindible para la minería moderna.

No obstante, persisten retos importantes y limitaciones en la ventilación subterránea que la tecnología actual aún no resuelve completamente. Uno de los mayores desafíos es el elevado consumo energético y costo asociado, tema en el que se centra el presente proyecto y que se

desarrollará en su objetivo y justificación.

Mover grandes caudales de aire a través de kilómetros de túneles con ventiladores de alta potencia requiere enorme energía eléctrica; de hecho, la ventilación suele representar un porcentaje significativo (en torno a un tercio o más) del consumo eléctrico total de una mina, llegando en algunos casos a constituir hasta el 50–70% de los costos operativos de electricidad en minas mecanizadas.

Esto supone no solo un gasto económico sustancial sino también un impacto ambiental (huella de carbono) considerable, dado que la energía en muchos lugares proviene de fuentes fósiles. Reducir el consumo sin comprometer la seguridad es entonces un reto clave.

Parte del problema es que, tradicionalmente, los sistemas de ventilación han operado de forma estática o con control manual mínimo: los ventiladores funcionan a plena capacidad todo el tiempo, ventilando incluso zonas deshabitadas o inactivas, lo cual es ineficiente.

Las tecnologías actuales empiezan a abordar esto mediante ventilación a demanda y controles inteligentes, pero su adopción aún no es universal. Muchas minas siguen con ventilación “siempre encendida” y distribución fija, desperdiciando potencial de optimización.

Implementar a gran escala sistemas automáticos que ajusten caudales y apaguen ventiladores innecesarios es un reto tanto tecnológico como organizativo (requiere inversión en sensores, comunicaciones, adaptación cultural, etc.).

Otro desafío es la complejidad creciente de las minas modernas. Las explotaciones actuales son más extensas y ramificadas, con múltiples niveles y frentes simultáneos. Esto deriva en redes de ventilación muy intrincadas, donde lograr que el aire llegue adecuadamente a todos los rincones es cada vez más complicado.

Conforme la mina se expande, aumentan las pérdidas de presión y pueden presentarse cuellos de botella en la circulación de aire. Un problema frecuente es que en las puntas más alejadas puede faltar caudal o presión suficiente, especialmente si no se ajusta el sistema (por ejemplo, abriendo más áreas sin añadir potencia de ventilación o sin reequilibrar reguladores). Los sistemas actuales abordan parcialmente esto añadiendo ventiladores secundarios o boosters, pero a veces de forma reactiva más que planificada, llevando a un sistema sobredimensionado o desbalanceado.

El reto pendiente es desarrollar metodologías y herramientas que optimicen automáticamente la ventilación en redes de gran escala, algo que aún no se ha logrado por completo. Estudios recientes señalan que la optimización de redes de ventilación extensas con técnicas avanzadas (algoritmos de inteligencia artificial, por ejemplo) permanece como un problema abierto por resolver.

Ligado a lo anterior está la monitorización y control en tiempo real. Actualmente, muchas minas carecen de una visibilidad instantánea de qué está pasando en todo su circuito de ventilación. Si bien se instalan sensores puntuales de flujo, gas o temperatura, a menudo la resolución

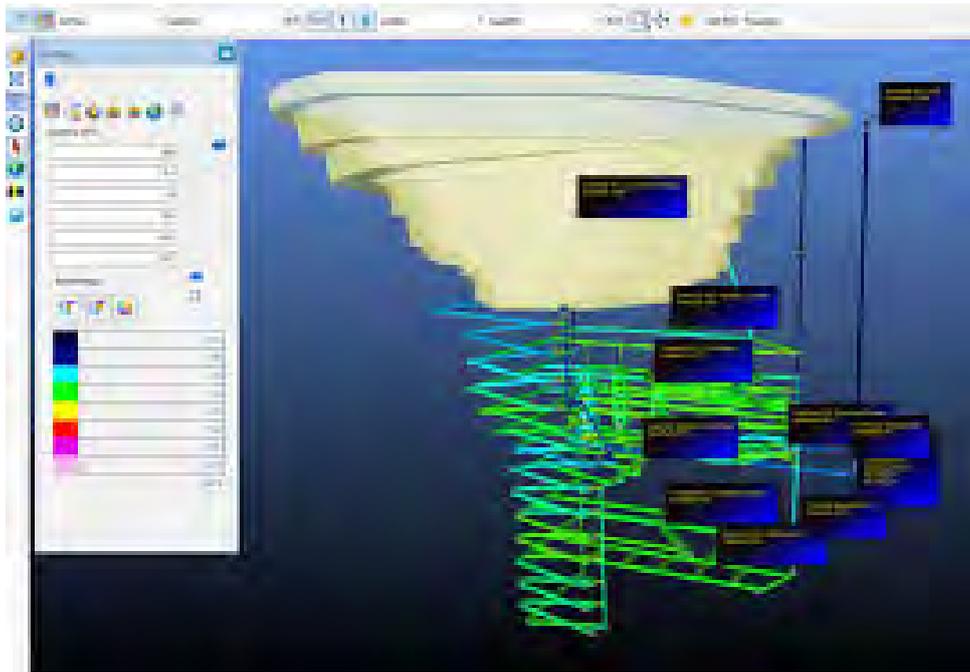


Figura 2.42: Modelo de mina más compleja en Ventisim

de datos es limitada.

Ello dificulta detectar rápidamente anomalías como caídas de flujo por obstrucciones, incrementos súbitos de gases o fallos de ventiladores. La reacción suele depender de inspecciones periódicas o de alarmas locales, en lugar de un sistema integral inteligente. El desarrollo de sistemas integrados de monitoreo que muestren el “estado de la ventilación” en cada zona es incipiente; algunas minas lo han implementado, pero no es aún estándar en toda la industria.

Consecuentemente, puede ocurrir que problemas como la recirculación inadvertida de aire viciado o la ventilación insuficiente en un frente nuevo tarden en identificarse, poniendo en riesgo la salud o reduciendo la eficiencia. El desafío aquí es extender la automatización (discutida en 2.4) a más operaciones, incluyendo minas medianas y pequeñas, y no solo las de gran capital.

Un problema específico que aún requiere atención es la gestión de calor en minas profundas. Si bien la ventilación ayuda a controlar la temperatura al extraer el aire caliente y traer aire superficial más frío, llega un punto (en profundidades extremas, mayores a 1000 m) en que el aire de ventilación por sí solo no basta para mantener condiciones tolerables, dada la acumulación de calor geotérmico.

En tales casos se necesitan sistemas de refrigeración activa (plantas de enfriamiento de agua, enfriadores de aire, hielo flocado, etc.), lo cual añade complejidad y gasto. Integrar eficientemente la ventilación con la climatización es un frente de desarrollo: cómo repartir el aire frío, cómo reutilizar aire recirculado a través de enfriadores sin comprometer calidad, etc.

Aunque esto se sale un poco del alcance puramente ventilatorio, es un reto conexo pendiente en el estado del arte: lograr minas ultraprofundas con clima controlado sin disparar exponen-

cialmente el costo energético.

Otro aspecto problemático son las contingencias como incendios o explosiones. La ventilación actual aborda parcialmente la prevención (diluyendo gases inflamables para evitar explosividad, manteniendo polvo en suspensión por debajo del umbral de explosión mediante limpieza y humectación).

Sin embargo, cuando ocurre un incendio subterráneo, la propia ventilación puede propagar humo y fuego a otras áreas. Las técnicas recientes incluyen ventilación reversible o seccionable para confinar incendios (por ejemplo, cerrando puertas para aislar un incendio y evitando alimentar con demasiado aire), pero manualmente esto es difícil de ejecutar en la emergencia.

Hacen falta sistemas automáticos de respuesta ventilatoria a emergencias: detectar rápidamente un incendio y reconfigurar ventiladores y reguladores para extraer humo protegiendo rutas de evacuación. Algunos desarrollos de control inteligente apuntan a eso, pero en la práctica es un reto técnico y de seguridad (un error podría empeorar la situación).

Por tanto, avanzar en ventilación adaptativa a emergencias es otra tarea pendiente. También cabe mencionar el cambio en las operaciones mineras que se avecina, como la introducción de vehículos eléctricos a batería en lugar de diésel. Esto, en teoría, reducirá la carga de contaminantes (menos gases de combustión) y la necesidad de caudal asociado a diluirlos, lo cual es positivo para la ventilación. Pero plantea nuevos retos: las baterías pueden liberar calor significativo y riesgos distintos (por ejemplo, emanaciones de gases de electrolito en caso de sobrecalentamiento, o requerir ventilación para controlar la temperatura de estaciones de carga). El avance deberá adaptarse a esos cambios tecnológicos en la minería, ajustando los criterios de diseño de ventilación a un escenario con menos contaminantes gaseosos pero quizás igual o mayor carga térmica en ciertos puntos (cargadores rápidos, etc.). Aún está por verse cómo equilibrar esto; es un campo emergente en el que las minas pioneras 100% eléctricas están proporcionando datos iniciales.

Cabe destacar que, las mejores tecnologías serán insuficientes si el personal no las utiliza correctamente: por ejemplo, algo tan sencillo como cerrar una puerta de ventilación tras pasar, o no alterar sin autorización un regulador, es vital.

La automatización puede minimizar la intervención humana, pero no la elimina del todo. Por eso, debe haber también sistemas de gestión y capacitación para que operadores y supervisores entiendan la importancia de mantener el circuito ventilatorio según el plan.

En definitiva, los sistemas actuales de ventilación han logrado enfrentar exitosamente la necesidad de atmósferas seguras en las minas, permitiendo operaciones a gran escala en entornos hostiles. Sin embargo, quedan retos pendientes notables: eficiencia energética, flexibilidad y control en tiempo real, manejo de redes complejas y profundas, y respuesta a condiciones cambiantes o de emergencia.

Superar estos desafíos es crucial para la sostenibilidad futura de la minería subterránea. La

siguiente sección explora cómo la automatización y el control inteligente están emergiendo precisamente como la solución para muchos de estos retos.

2.4 AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INTELIGENTE

En años recientes, la industria minera ha comenzado a incorporar la automatización y control inteligente de la ventilación como respuesta a los desafíos antes mencionados. Tradicionalmente, la ventilación se controlaba de forma manual; los ventiladores funcionaban a una velocidad fija y era el personal quien ajustaba reguladores periódicamente. Otras acciones como abrir o cerrar puertas también requerían la presencia de los trabajadores. Esto está cambiando con la introducción de sistemas telemetrizados y el uso de algoritmos avanzados, que buscan operar la ventilación de forma dinámica, eficiente y segura sin la necesidad de intervención constante de los operadores.

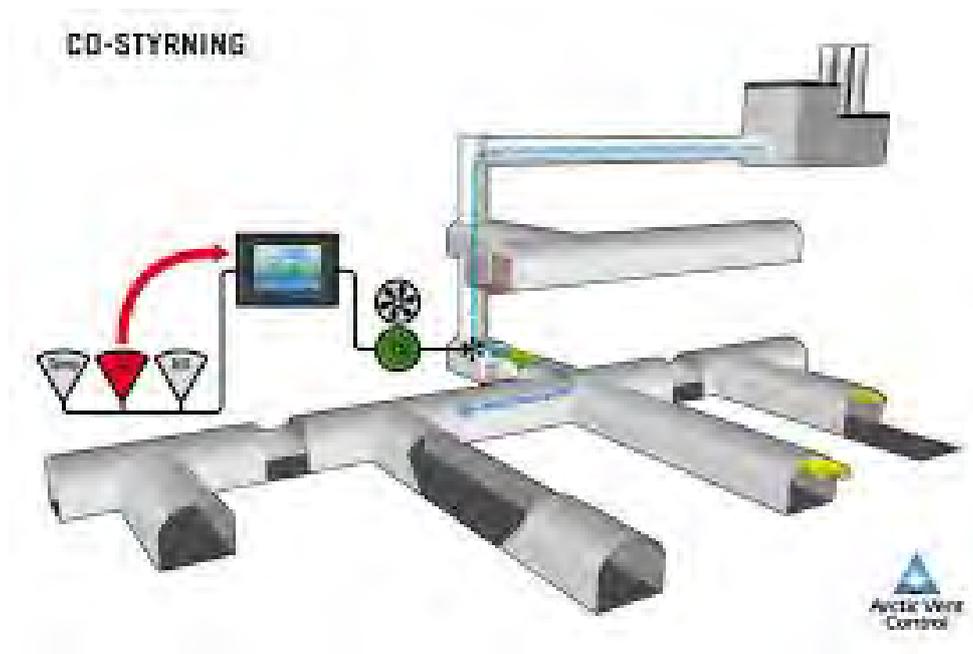


Figura 2.43: Ventilación bajo demanda

Son numerosos los estudios que demuestran los beneficios que suponen la incorporación de sistemas automatizados en el ámbito minero.

- Tras una revisión académica exhaustiva donde se analiza la implementación de la automatización en el campo de la minería, se exploró el uso en tecnologías específicas, como en los camiones autónomos (Automated Haul Truck System) Long et al. [14]. Quedó demostrada una mayor eficiencia a la hora de operar, llegando a trabajar 700 horas más al año de lo habitual, y reduciendo los costes de carga en un 15%. Además, se mejora la seguridad reduciendo la exposición a riesgos. También informa de la presencia de errores humanos que se pueden prevenir con sensores.

- Por otro lado, según Hazrathosseini y Afrapoli [10], donde se analizan los sistemas inteligentes de gestión de flotas y el impacto que pueden tener en las operaciones mineras en superficie, esta implementación llevó a disminuir las emisiones de CO₂ en un 30% y aumentó la productividad significativamente.

- Según Boloż y Biały [3], y tras una revisión de los resultados al aplicar tecnologías robotizadas y automatizadas en Polonia, se explica cómo es posible crear un proceso autónomo de extracción rentable y segura de carbón donde el operario tan solo regula la velocidad de la maquinaria desde la superficie. Esto mejora tanto la comodidad del trabajador como la eficiencia operativa, y permite detectar condiciones anómalas o potencialmente peligrosas. Paralelamente, se detalla cómo es aplicable para la explotación, perforación, monitoreo, limpieza de puestos concretos o incluso para una posible minería espacial o en ambientes extremos dentro del planeta.

- Atendiendo al estudio de Zhironkin y Szurgacz [27], tras la revisión de más de 15 estudios científicos dentro del ámbito de la automatización, seguridad y sostenibilidad, se demuestra que una minería inteligente permite realizar análisis en tiempo real con IA y disponer de sitios completamente autónomos. Ratifica el control térmico por infrarrojos, el monitoreo acústico en perforadoras y la selección inteligente de los diferentes equipos a emplear. Además, señala que la automatización reduce significativamente el coste energético de transportadores y perforadoras, aunque requiere una base digital sólida.

- Por otro lado, Saleem [22] expone un estudio avanzado sobre la optimización de la ventilación en minas subterráneas, centrándose concretamente en la mina Jabal Sayid en Arabia Saudí. A partir de un modelo que contenía **machine learning**, se pudo ahorrar un 31.24% del consumo eléctrico de ventilación. Además, se obtuvieron mejores resultados de caudal y presión, ya que se adaptaban a las condiciones del momento gracias a un monitoreo continuo en tiempo real. Paralelamente, permitía predecir velocidades de aire, diferentes temperaturas y requerimientos de flujo. También se lograron resistencias mínimas y eficiencias de hasta el 70%.

- Por último, Chen et al. [7] asegura que el uso de un sistema de ventilación basado en sensores en tiempo real permite mejorar la seguridad, el control y la eficiencia energética de la mina.

La siguiente tabla resume algunos de los datos más destacables:

Estudio y referencia	Datos destacables
Long et al. (2024) [14]	Camiones autónomos trabajan 700 h más/año, 15% menos en costes de carga, mayor seguridad y prevención de errores humanos mediante sensores.
Hazrathosseini et al. (2024) [10]	FMS inteligente reduce 30% de emisiones de CO ₂ y mejora productividad entre 5.56% y 23% según el tipo de operación minera.
Bòloz (2020) [3]	Robotización en Polonia permite extracción autónoma de carbón, mejora eficiencia, seguridad y aplicabilidad en entornos extremos.
Zhironkin et al. (2021) [27]	Revisión de 15 estudios: minería inteligente con IA, monitoreo térmico y acústico, selección óptima de equipos, y reducción energética.
Sustainability (2025) [22]	Optimización de ventilación con ML: ahorro energético del 31.24%, mayor eficiencia del sistema (hasta 70.4%), y predicción en tiempo real.
Chen et al. (2024) [7]	Sensores en tiempo real para ventilación mejoran seguridad, control y eficiencia energética en minas subterráneas.

Cuadro 2.3: Resumen de estudios científicos sobre la automatización minera y sus beneficios

Un concepto central en esta tendencia es la Ventilación bajo Demanda (VoD), que consiste en ajustar el caudal y distribución de aire en función de las necesidades reales en cada zona de la mina en tiempo real.

Es decir, en vez de ventilar todas las galerías por igual todo el tiempo y de una forma constante, se incrementa el flujo hacia las áreas donde hay actividad y se reduce al mínimo necesario en áreas inactivas o desocupadas.

Dado que típicamente en una mina solo un porcentaje relativamente pequeño de los frentes está en producción activa simultáneamente, quedando el resto abandonado o en labores de mantenimiento, el potencial de ahorro energético al modular la ventilación es enorme.

Es por ello que uso de VoD puede reducir drásticamente el consumo de energía de ventilación, así como permitir bajar la velocidad de los ventiladores principales en ciertas horas, prolongando su vida útil.

2.4.1 Componentes

Para hacer realidad la ventilación automatizada, se necesitan varios componentes tecnológicos como sensores, actuadores y un sistema de control central.

Sensores Los sensores incluyen medidores de flujo de aire, sensores de presión diferencial, detectores de presencia de personal o vehículos, monitores de gases (CO, NO_x, metano, etc.) y temperatura/humedad en puntos clave.

Estos sensores proporcionan en todo momento un diagnóstico del estado de la atmósfera y del flujo en la mina.

Debido al gran progreso en electrónica e informática, hay una cantidad inmensa de sensores desarrollados aplicables para este ámbito. A continuación, se mencionan y explican brevemente

varios de ellos, aptos para entornos industriales y capaces de medir en tiempo real diferentes variables:

1. **Sensor infrarrojos NDIR:** Mide CO_2 en ppm. Funciona por absorción de luz infrarroja. Alta precisión y buena estabilidad. Ideal para monitoreo continuo en ambientes industriales.
2. **Sensor MQ-2:** Mide CO , *humo*, *alcohol*, *LPG*. Sensor semiconductor de óxido metálico. Económico, rápida respuesta, pero baja precisión. Requiere calibración frecuente.
3. **Sensor MQ-7:** Mide *Monóxido de carbono (CO)*. Alta sensibilidad. Sensor de bajo coste para prototipos. No apto para entornos críticos.
4. **Sensor MQ-135:** Mide CO_2 , *amoníaco*, *benceno*, *gases tóxicos*. Multigás. Amplio rango, pero sensibilidad variable. Afectado por humedad y temperatura.
5. **Sensor electroquímico de CO (Dräger):** Mide CO en ppm. Alta precisión mediante reacción química. Certificado para uso en minería. Vida útil: 2–3 años.
6. **Sensor electroquímico NO_2 / CH_4 :** Mide NO_2 o *metano (CH_4)*. Alta sensibilidad. Salida digital o analógica 4–20 mA. Requiere calibración y mantenimiento regular.
7. **Sensores SHT31 / SHT85:** Miden *Temperatura y humedad*. Sensores digitales de alta precisión. Salida I2C. Resistentes a la humedad.
8. **Sensor DHT22:** Mide *Temperatura y humedad*. Mejor precisión y rango que el DHT11. Digital. Respuesta moderada.
9. **Sensor DHT11:** Mide *Temperatura y humedad*. Sensor básico, económico. Menor precisión. Útil para pruebas.
10. **Sensor BME280:** Mide *Temperatura, humedad y presión barométrica*. Sensor digital Bosch. Alta precisión. Interfaces I2C/SPI. Compacto y confiable.
11. **Sensor de partículas PMS7003:** Mide $PM_{2.5}$ / PM_{10} . Detección de partículas por láser. Buena estabilidad. Muy útil en presencia de sílice o carbón.
12. **Sensor PIR (infrarrojo pasivo):** Mide *presencia de personas*. Detecta cambios de infrarrojos emitidos por cuerpos en movimiento. Bajo consumo y buena cobertura.
13. **Sensor MEMS:** Detecta *vibraciones anómalas*. Tecnología microelectromecánica. Mide aceleraciones en tres ejes. Útil para monitorizar motores o ventiladores.
14. **Anemómetro ultrasónico:** Mide *velocidad y dirección del aire*. Sin partes móviles. Alta precisión. Ideal para condiciones hostiles.
15. **Sensor de presión diferencial (Delta P):** Mide *diferencia de presión entre dos puntos*. Detecta obstrucciones o rendimiento de ventilación. Salida analógica o digital. Compatible con PLCs.

Actuadores Los actuadores son los dispositivos que pueden modificar el estado del sistema de diferentes maneras. Pueden, por ejemplo, variar la frecuencia de los ventiladores o abrir / cerrar compuertas automáticamente. El cerebro es un software de control (que puede residir en un PLC maestro, en un sistema SCADA o en una plataforma especializada) que recibe los datos de sensores y, con base en algoritmos predefinidos o inteligencia artificial, decide las acciones óptimas sobre los actuadores.



Figura 2.44: PIC para entornos explosivos

Al igual que en el caso de los sensores, se tiene un gran número de actuadores, por lo que a continuación se exponen algunos de ellos:

1. **Ventilador con variador de frecuencia (VFD):** Controla y modifica el flujo de aire. Permite ajustar la velocidad del ventilador según la demanda. Mejora la eficiencia energética y reduce el desgaste. Controlado por señal analógica o digital desde PLC o SCADA.
2. **Compuerta motorizada:** Abre o cierra el paso de aire. Utiliza motores eléctricos o servos para mover compuertas en conductos. Puede ser controlada local o remotamente. Compatible con sistemas automáticos de ventilación bajo demanda.
3. **Actuador neumático:** Empuja o retrae las compuertas con presión de aire. Funciona mediante presión de aire comprimido. Alta velocidad de respuesta y fuerza. Requiere una red de aire comprimido y electroválvulas. Robusto en ambientes húmedos y polvorientos.
4. **Relé de estado sólido (SSR):** Controla el encendido y apagado de los ventiladores. Dispositivo electrónico sin partes móviles. Alta fiabilidad y velocidad de conmutación. Ideal para automatización. Soporta cargas inductivas. Larga vida útil.
5. **LED inteligente:** Indica la situación y posibles estados de alerta. Sistema visual que cambia de color o patrón según el estado del sistema (verde: normal, rojo: alerta, etc.). Bajo consumo. Integración con SCADA o microcontroladores.

6. **Buzzer (zumbador):** Alarma sonora. Emite señal acústica ante condiciones anómalas. Puede ser activado automáticamente por sensores o eventos de emergencia. Bajo voltaje, fácil de integrar.

Como se ha mencionado, todos estos sensores y actuadores están coordinados por Automatas Programables (PLC) y/o Sistemas de Control SCADA, que actúan como el “cerebro” del sistema. El PLC (Programmable Logic Controller) es un dispositivo industrial robusto, diseñado para operar en condiciones extremas (temperatura, humedad, polvo, vibraciones) de forma fiable y continua (24/7).

Un PLC típico cuenta con:

- **Entradas analógicas y digitales:** permiten leer el estado de sensores. Por ejemplo, sensores industriales con salidas de 4–20 mA o 0–10 V se conectan a entradas analógicas. Sensores como los MQ o DHT requieren adaptadores o microcontroladores intermedios. Ejemplo: un PLC Omron CJ1M admite módulos de entrada analógica compatibles con sensores industriales.
- **Salidas de control**, que pueden ser:
 - Digitales, para activar relés, alarmas o compuertas.
 - Analógicas, para controlar dispositivos como variadores de frecuencia (VFD), ajustando la velocidad de ventiladores.
- **Lenguajes de programación industrial**, normalizados por IEC 61131-3, como:
 - Ladder Diagram (LD) – lenguaje gráfico similar a esquemas eléctricos.
 - Function Block Diagram (FBD).
 - Structured Text (ST).
 - Grafcet o SFC.

En este proyecto se empleará principalmente Ladder, debido a su amplia adopción en la industria minera.

- **Capacidades de comunicación**, con protocolos como Modbus, Ethernet/IP, Profibus, etc., para conectar con otros dispositivos o con una plataforma SCADA central.
- **Alta fiabilidad y seguridad funcional**, gracias a características como:
 - Watchdogs de seguridad (reinicio automático en caso de fallo),
 - Entradas redundantes,
 - Programas de emergencia ante pérdida de señal o fallo de red.

Existen incluso PLC y módulos certificados para entornos explosivos (ATEX) o con requisitos de seguridad funcional (SIL), que son aplicables a minería subterránea, aunque no serán incluidos en el presente prototipo.

En una mina moderna, un sistema SCADA centraliza la operación desde una sala de control en superficie, donde recibe datos de múltiples sensores distribuidos y envía comandos a ventiladores, compuertas, compresores o sistemas de alarma, facilitando así una gestión remota, segura y eficiente de la ventilación y del entorno subterráneo.

Al hablar de automatización ha de entenderse que puede haber diferentes niveles en función de su complejidad y funcionamiento:

- En un primer nivel básico el control inteligente permite el control remoto de los equipos, como lo puede ser arrancar o detener ventiladores desde la sala de control en superficie, o cambiar la posición de un regulador. Esto ya aporta ventajas de seguridad (no exponer al trabajador a trayectos largos solo para maniobrar ventilación) y agilidad en respuestas.
- En un segundo nivel se introduce la ya mencionada ventilación bajo demanda automática, donde el sistema ajusta los ventiladores y reguladores con base en reglas según la presencia o requerimiento. Por ejemplo, si un sensor detecta que un vehículo o personal ingresó a una zona determinada, el sistema puede automáticamente abrir un regulador para enviar más aire fresco a esa zona o encender un ventilador auxiliar allí. Al terminar la actividad, cierra válvulas y apaga equipos para ahorrar energía.
- En un tercer nivel avanzado, se emplean algoritmos optimizadores multivariables con retroalimentación de múltiples sensores para manejar de forma simultánea todos los ventiladores de la mina buscando el trabajo más eficiente posible. Así, se regula cada ventilador principal y auxiliar, y la apertura de cada regulador, de forma coordinada, buscando un objetivo global, que suele ser mejorar la seguridad y eficiencia del entorno. Un resultado típico de este nivel es que todos los ventiladores trabajen en su punto de eficiencia óptima para la demanda del momento, evitando un gasto innecesario de energía. Se expone a continuación una explicación sencilla: si la demanda baja, el sistema reduce velocidades, si sube, las aumenta, siempre de manera coordinada para evitar que una zona quede más ventilada de lo necesario mientras otra sufre escasez.

Los beneficios que la automatización y el control inteligente aportan son notables, ya sea en términos de seguridad y salud, productividad, vida útil, eficiencia y capacidad operativa.

Otra faceta importante de la modernización es la incorporación de modelos predictivos e inteligencia artificial. En una situación global donde esta herramienta no para de crecer, su uso para las labores en ingeniería no se queda atrás.

A pesar de estar en fases de desarrollo iniciales y por supuesto no cubrir todos los problemas complejos, en nivel avanzado se utiliza un modelo del sistema ventilatorio para predecir cómo responderá ante ciertos cambios, y con base en ello optimizar. Algunos sistemas incluso usan aprendizaje automático para refinar ese modelo partiendo de datos históricos. La IA también puede ayudar en tareas como detección de fallas de ventilación (p. ej., identificar automáticamente si un sector tiene una resistencia anormal que indica un bloqueo) y en reajustar el control ante situaciones no previstas por métodos deterministas tradicionales.

Digital twin Además del control operativo, la automatización ha traído consigo herramientas de simulación y capacitación integradas. Por ejemplo, existen simuladores de ventilación en

tiempo real acoplados al sistema de control, donde se pueden probar escenarios (como cerrar cierta puerta, o simular un incendio) sin arriesgar la operación real. Esto permite tanto entrenar a operadores en la sala de control como evaluar estrategias de respuesta a contingencias con anticipación. Un caso es la integración de VentSi con sistemas como el ABB Optimizer, de modo que el simulador puede interactuar con el sistema de control para predecir comportamientos y optimizar parámetros.

3. PLIEGO DE CONDICIONES

El presente pliego de condiciones tiene por objeto establecer los requisitos técnicos, legales y de seguridad aplicables al proyecto de automatización de las instalaciones y sistemas operativos de una mina subterránea situada en el territorio nacional. El alcance del proyecto comprende la implementación de tecnologías de automatización orientadas a mejorar la eficiencia operativa, el control ambiental, la seguridad de los trabajadores y la supervisión remota de los procesos subterráneos, incluyendo ventilación, transporte, drenaje, comunicaciones, detección de gases y sistemas auxiliares.

3.1 OBJETO Y ALCANCE

El actual proyecto se centra en el diseño de un sistema automatizado de la ventilación en el contexto de una mina subterránea. Como se ha justificado anteriormente, el sistema de ventilación de una mina es vital para poder mantener un entorno seguro dentro del contexto minero, tanto para los trabajadores como para la propia maquinaria.

Un correcto diseño de la ventilación de una mina no solo proporcionará a esta seguridad, sino que se asegurará una mayor eficiencia y, por tanto, un mayor ahorro energético que repercutirá en la economía del proyecto. Es por ello que el presente proyecto va a describir los procesos necesarios para automatizar este sistema de una forma básica, empleando una placa de Arduino. El prototipo de simulación desarrollado tiene como objetivo replicar y comprobar el correcto funcionamiento de un sistema automatizado. Permitirá explorar diferentes soluciones técnicas, que pueden ser analizadas en detalle sin interferir en las operaciones reales de una mina en funcionamiento. Este enfoque tiene numerosas ventajas, pues es posible analizar el comportamiento de los sistemas ajustando los parámetros antes de su implementación, y es capaz de anticipar posibles fallos. Dicha aproximación supone múltiples beneficios: reduce los costes, disminuye los tiempos de desarrollo y permite analizar más alternativas disponibles. Además, al no poner en riesgo la seguridad de los trabajadores ni comprometer la continuidad, se incrementa la seguridad global. También se logra optimizar la eficiencia operativa, pues se pueden identificar configuraciones más eficientes y específicas para cada mina.

El proyecto abarcará desde su montaje y recogida de datos hasta el sistema automatizado, que actuará en función de estos datos recibidos. Para ello se definirán los procesos, los sensores y componentes utilizados y se acompañará de los planos, esquemas y archivos necesarios para su posible replicación o modificación.

Finalmente, sistema se validará mediante un prototipo con diferentes galerías que operará en unas condiciones supuestas dentro del estado español, y tratará de demostrar la eficacia y necesidad de automatizar el proceso de ventilación de una mina.

3.2 REQUISITOS FUNCIONALES Y TÉCNICOS

El sistema debe garantizar una respuesta automática ante concentraciones superiores a los límites establecidos (ppm), detectadas por el sensor MQ-2 y activando los ventiladores mediante relé. La lectura de temperatura debe mantenerse dentro del rango de 15 a 33°. El panel de control deberá incluir señalización LED y sonora de forma visible y comprensible. Todos los componentes eléctricos deberán funcionar con bajo voltaje (5V–12V) y estar correctamente aislados.

Todo ello debe funcionar de forma autónoma una vez el sistema se encuentre alimentado. Para cumplir dichos requisitos funcionales y técnicos, se eligen los componentes desarrollados en el capítulo 4.2.1.

Por otro lado, el sistema requerirá una serie de software, como lo es el algoritmo de control, la lógica de seguridad o la interfaz gráfica para el monitoreo. El código se desarrollará en el capítulo 4.3.4, junto con sus resultados y umbrales elegidos.

Se busca, por tanto, tener un sistema que realice lo que se expone en la tabla 3.1:

Cuadro 3.1: Estados del sistema según condiciones de sensores

Condición	LED Rojo	LED Verde	Relé (V12)	Buzzer	LCD
Valores aceptables	OFF	ON	OFF	OFF	Valores
Fuera del umbral > 500	ON	OFF	ON	ON	Valores
No hay movimiento	OFF	OFF	OFF	OFF	“Sin presencia”

3.3 NORMATIVA

A continuación, se detallarán las normas técnicas y legales de obligado cumplimiento que deben considerarse para el diseño y la ejecución del sistema de ventilación en una mina subterránea. Dado el entorno específico y potencialmente peligroso en el que se desarrollan las labores mineras, la automatización debe programarse de tal forma que cumpla con la normativa minera española vigente. De esta forma se garantizará en todo momento la protección del personal y la integridad de las instalaciones.

Se deberá seguir, en primera instancia, el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, aprobado por el Real Decreto 863/1985. Este reglamento contiene las reglas generales de seguridad aplicables a todas las explotaciones mineras del territorio nacional.

De forma más concreta, y poniendo el foco en la ventilación dentro de las labores subterráneas, ciertos artículos de este reglamento se dedican a esta labor. Además, se han de seguir los requerimientos mínimos desarrollados en las ITC (Instrucciones Técnicas Complementarias). A continuación, se hace una revisión de los aspectos más destacables:

- **Artículo 67 - Ventilación general en labores subterráneas:** Obligatoriedad de ventilar todos los frentes y galerías con un caudal de aire continuo y suficiente, adaptado a las condiciones. El aire introducido debe estar limpio de contaminantes y debe haber ventiladores auxiliares instalados. Debe mantenerse un registro de ventilación.
- **Artículo 68 - Temperatura máxima:** La temperatura en las labores subterráneas no debe exceder los 33°C, salvo excepciones autorizadas.

- **Artículo 69 - Límites de gases peligrosos y O₂ mínimo:** El valor mínimo de oxígeno es del 19%. Los límites de otros gases quedan delegados a las ITC.
- **Artículo 70 - Circuitos diferenciados para entrada/salida de aire:** Se prohíbe usar el mismo pozo salvo excepciones.
- **Artículo 71 - Ventilación en labores inactivas:** Las zonas no ventiladas deben estar señalizadas visiblemente.
- **Artículo 74 - Salubridad del aire:** Se debe garantizar un ambiente saludable y seguro en todos los puestos de trabajo.



Figura 3.1: Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera

ITC 04.7.01 - Circulación de la corriente de aire

- La ITC 04.7.01 resume los requisitos mínimos y máximos en cuanto a las exigencias requeridas para la circulación de aire, como por ejemplo:
 - Caudal mínimo: 40 l/s de aire fresco por persona.
 - Se deben emplear medios mecánicos si la ventilación natural es insuficiente.
 - La velocidad del aire no debe superar los 8 m/s, salvo en zonas sin tránsito humano.

ITC 04.7.02 - Límites de concentración de gases

- La ITC 0.4.7.02 establece las concentraciones de gases máximas permitidas:
 - CO: 50 ppm promedio (hasta 100 ppm valor techo)
 - CO₂: 5000 ppm (hasta 12500 ppm)
 - NO + NO₂: 10 ppm (hasta 25 ppm)
 - SO₂: 5 ppm (hasta 10 ppm)
 - H₂: 1000 ppm (hasta 10000 ppm)
 - H₂S: hasta 50 ppm (valor techo)
 - Si se detecta grisú, se aplicarán medidas adicionales bajo supervisión de la autoridad minera.

ITC 04.7.03 - Ventiladores y puertas

- Para una correcta definición de las características técnicas de ventiladores y puertas, la ITC 04.7.03 establece una serie de requerimientos mínimos:
 - La ventilación debe estar asegurada por medios mecánicos.
 - Deben instalarse dispositivos de aviso en caso de parada.
 - Las puertas deben ser dobles, ignífugas y permanecer cerradas; las de socorro, desmontadas.

ITC 04.7.04 - Aforos, planos y libros

- La ITC 04.7.04 regula los procedimientos y documentación obligatoria en el ámbito de la ventilación subterránea minera. Se puede destacar:
 - Aforos mensuales en puntos clave.
 - Registro de temperaturas, gases, número de personas/motores y observaciones.
 - Plano actualizado de ventilación en la oficina técnica.
 - Presentación anual de una Memoria de Ventilación junto con el Plan de Labores.

Otras normas Además del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera y las complementarias ITCs, hay otra serie de normas de obligado cumplimiento en este sector, referidas principalmente a la seguridad de los trabajadores:

- **Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales:** Prioriza la ventilación técnica frente al uso de EPIs.
- **RD 773/1997 sobre EPIs:** Uso limitado a cuando no se pueda eliminar el riesgo de otra forma. Autorescatadores en entornos subterráneos peligrosos.
- **RD 1389/1997 - Seguridad en industrias extractivas:**
 - Ventilación permanente.
 - Ventiladores mecánicos si la natural es insuficiente.
 - Alarmas ante parada de ventiladores.
 - Registro actualizado de ventilación.
 - En minas grisuosas, la detección continua de grisú es obligatoria en zonas críticas.

Aspecto	A destacar
Caudal de aire	Mínimo 40 l/s por persona (ITC 04.7.01).
Oxígeno mínimo	19 % (Art. 69).
Temperatura máxima	33°C (Art. 68).
Velocidad del aire	Máxima de 8 m/s en zonas transitadas (ITC 04.7.01).
Límites de gases peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> ■ CO: 50 ppm (100 ppm máx.) ■ CO₂: 5000 ppm (12500 ppm máx.) ■ NO + NO₂: 10 ppm (25 ppm máx.) ■ SO₂: 5 ppm (10 ppm máx.) ■ H₂: 1000 ppm (10000 ppm máx.) ■ H₂S: hasta 50 ppm
Sistemas de ventilación	Mecánicos obligatorios si la natural es insuficiente. Deben contar con alarmas ante parada (ITC 04.7.03).
Seguridad en zonas sin ventilación	Deben señalizarse claramente (Art. 71).
Documentación obligatoria	Plano de ventilación actualizado, aforos mensuales, memoria anual (ITC 04.7.04).
Prioridad normativa	Primero medidas técnicas (ventilación), luego EPIs como última opción (Ley 31/1995 y RD 773/1997).

Cuadro 3.2: Resumen visual de requisitos clave para ventilación en minas subterráneas

4. METODOLOGÍA E INNOVACIÓN

4.1 PREÁMBULO

En una situación real el o los sistemas empleados de automatización (ya sea de ventilación o de otro campo) suelen ser puestos en práctica mediante PLC (controladores lógicos programables), ya que estos sistemas son altamente fiables y están diseñados para trabajar en entornos más complejos y exigentes que el que se representará en este trabajo.

Sin embargo, en el presente proyecto se ha optado por emplear un sistema de Arduino con su correspondiente microcontrolador, y no un PLC al uso. Esta elección es bastante simple de justificar, y es que atendiendo a aspectos como la complejidad requerida, el coste o la simple accesibilidad y manejabilidad, se destacaba como una opción muy efectiva dentro del ámbito académico en el que se realiza. La fácil integración de los sensores necesarios de temperatura o detectores de gas, así como la plataforma de Arduino, que es flexible y muy didáctica permite simular con eficacia como sería el comportamiento lógico dentro de un sistema automatizado a una escala reducida, demostrando sus beneficios de forma muy visual sin la complejidad que supone usar un PLC industrial.

Esta decisión no compromete los objetivos del proyecto, pues su enfoque principal no es otro que el de demostrar el principio de funcionamiento, control y eficiencia de un sistema de ventilación automatizado basado en las condiciones que se dan en su entorno en tiempo real. Es por ello que, pese a usar una escala muy reducida, en una aplicación real los algoritmos desarrollados simplemente se tendrían que adaptar a un entorno industrial con un PLC.

4.2 TOMA DE DECISIONES TÉCNICAS

4.2.1 Componentes eléctricos

Durante el diseño del prototipo de simulación se tomaron diferentes decisiones técnicas a la hora de seleccionar los componentes a usar.

Para ello, se tuvieron en cuenta factores como la funcionalidad, la disponibilidad y el precio o la viabilidad de integración. A continuación se explican estas decisiones con sus criterios empleados:

Placa Elegoo Mega 2560: se optó por este modelo de microcontrolador, principalmente, por ser compatible con Arduino. Dentro de los diferentes modelos apareció la posibilidad de elegir un Arduino UNO o una ESP32 en su defecto, pero debido a la gran cantidad que esta placa ofrece en comparación con las otras dos, y la pequeña diferencia de precio que tienen, se optó por esta.

Los sensores MQ-2 y DHT11 permiten detectar las variables que se quieren tener en cuenta (gases como propano, butano, metano o alcohol, humedad y temperatura). Debido a su bajo costo, sensibilidad variable por el usuario y capacidad de dar como salida señales lógicas eran características que se buscaban. Si bien había otras opciones (MQ3, DHT22...) estos modelos se consideraron suficientes, ya que contaban con un amplio reconocimiento y su uso a nivel educativo y experimental era muy habitual.

En cuanto a los ventiladores, se decidió emplear dos tipos de ellos. Por un lado, los ventiladores de 5V eran más pequeños (aspecto muy importante en este caso, ya que debía ser adaptado al tamaño del prototipo), por lo que tenían menor potencia y caudal que otras opciones. Estos ventiladores se consideraron suficientes para ser usados como parte de la ventilación principal, pues su función es simular un flujo de aire activo y constante dentro del entorno subterráneo.

Por otro lado, el ventilador de 12V tiene un mayor tamaño (más del doble) y genera un mayor flujo de aire, por lo que se consideró que era una mejor opción para la ventilación auxiliar, que se diseñará para activarse en presencia de condiciones críticas, como un nivel elevado de gas o una alta temperatura, que puedan ser perjudiciales para los trabajadores o para la maquinaria. En este caso, su mayor potencia permite generar un mayor cambio ambiental que el que generaría un ventilador de 5V, facilitante la visualización directa del efecto del ventilador en la medición de los sensores (disiparía mejor los gases para el sensor MQ-2 o reduciría antes la temperatura para el caso del DHT11). Además, este ventilador requiere un mayor voltaje y corriente que los suministrables por parte de la placa elegida Mega, por lo que se decidió incorporar un módulo de relé.

Este componente actuará como un interruptor que permitirá o no la llegada de una corriente de una fuente externa al ventilador, en función de la señal digital emitida por el microcontrolador. Por tanto, además de permitir cargas mayores, aísla eléctricamente al microcontrolador, funcionando como un elemento protector de gran importancia.

Ambos ventiladores, además, pueden contar con un transistor que funcionará también como un interruptor.

La pantalla LCD se integró para mostrar valores de gas, temperatura o humedad, permitiendo una información visual accesible. Se eligió este modelo por ser ampliamente reconocido.

Además, se emplearon otros aparatos electrónicos más básicos como cables dupont, buzzers o leds, que se integrarán a un panel y facilitarán la comprensión en tiempo real de lo que está ocurriendo en el prototipo (por ejemplo, cuando los gases sean elevados, se activará un indicador rojo, mientras que si todo funciona correctamente, habrá un verde). Todo ello se incorporará a un panel de control.

4.2.2 Materiales constructivos

Para la elección de los materiales y formas de crear el prototipo se tuvieron en cuenta factores como el peso, precio, valor visual o la manejabilidad.

Se decidió hacer una parte superior simulando la parte a cielo abierto por dos motivos:

- Teórico

Que sea, en primer lugar, útil a nivel académico y como trabajo científico (así, al hacer visible la parte superior, se permite mostrar los pozos de entrada y salida de aire limpio, así como la localización de algún ventilador).

- Visual

En segundo lugar, se busca obtener un resultado final visualmente demostrativo y fácilmente comprensible, con el objetivo de una posible divulgación científica. Al incorporar una parte exterior más visual se logra ese objetivo.

Para esta parte se empleó poliestireno expandido, principalmente debido a su bajo peso y a su facilidad a la hora de esculpir formas topográficas como los bancos. También permitía dividir claramente el entorno exterior y superior. Para reforzar un valor visual y hacerlo más aproximado a la realidad, se usó yeso para recubrir el poliestireno, pues aunque aportaba algo más de peso, el resultado final era mucho mejor y la cantidad a usar era variable.

Por otro lado, la parte subterránea podía hacerse maciza empleando nuevamente poliestireno. Sin embargo, como el valor realmente lo tenían las galerías se decidió modelar e imprimir estas en 3D, y no representarlas como un hueco. Esto supuso varias ventajas: Aunque pueda no parecerlo, el precio sería menor. Se estimó un uso de unos 500 gramos de PLA, que tomando como referencia filamentos de la marca ELEGOO suponían unos 6-7€, frente a los 25-30€ que podía valer un bloque de 40x40x20 cm. Además, el hecho de modelar las galerías en softwares como autocad permitía incluir en el proyecto los planos de las mismas, otorgando un mayor valor académico. Por último, la impresión 3D permitía una precisión dimensional difícilmente alcanzable con el tallado del poliestireno.

Finalmente, se decidió realizar un corte frontal de estas y cerrarlas con metacrilato a cortado a medida, permitiendo al usuario ver el interior de estas, con sus sensores incorporados y diferentes detalles que otorguen realismo al prototipo. Para ello se realizaron unos carriles guía por los que entra y sale este material.

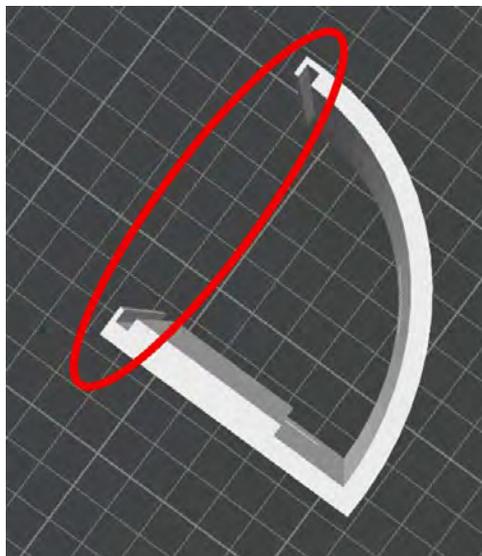


Figura 4.1: Carriles guía

4.2.3 Otras decisiones

Una vez explicadas las decisiones materiales, queda justificar las decisiones referentes a los umbrales de activación o al propio diseño del prototipo.

■ Umbrales de activación:

El prototipo pretende actuar de una forma u otra en función de los valores leídos por los sensores. Estos valores tienen una gran variabilidad en función de la situación en la que aparezcan, pues dependen de la normativa del país o región, de la propia zona o de las condiciones del momento.

En este caso particular, se decide considerar la presencia de la mina dentro de la comunidad autónoma de Cantabria. Es por ello que deberá tener en cuenta la variabilidad de las condiciones ambientales y la normativa española desarrollada anteriormente en el capítulo 3.3.

Al tratarse de un prototipo con fines educativos, los umbrales de activación van a diferir algo con los que serían en realidad, siendo estas variables dentro del código de programación de una forma muy sencilla. Para poner estos valores se realiza un montaje simple dentro de la escuela (buscando tener condiciones parecidas a las que habrá en la defensa del proyecto) con la placa ELEGOO Mega y los sensores MQ-2 y DHT11. Mediante un código sencillo de lectura de estos datos, y una serie de plotters, se obtiene la siguiente gráfica de valores:

Se puede ver que los gases se mantienen en unos niveles entre 350-400, la humedad entorno al 60% y la temperatura ronda valores de 27 grados. Por tanto, buscando tener valores que se puedan alcanzar relativamente fácil durante la presentación (con el uso de un mechero bunsen no será difícil aumentar la temperatura y la cantidad de gas) se decide elegir los siguientes valores

- Umbral de temperatura: 32°
- Umbral de humedad: 20
- Umbral de cantidad de gas: 550 ppm

Estos valores quedan sujetos a modificaciones dentro del código del programa, ya sea para una situación real y por tanto seguir la normativa necesaria, como por otras condiciones a la hora de exponer el proyecto y necesidad de ajuste.

De esta forma, se consigue reflejar el concepto de ventilación por demanda, donde se ajustan los recursos en función de la situación.

Por ese mismo motivo, se decide implementar dos niveles de ventilación. Se busca dar un enfoque realista y a su vez funcional. La ventilación primaria debe estar conectada y debe haber siempre un flujo (esto se consigue con el ya mencionado ventilador de 5V), pero en ciertos momentos o situaciones este puede no ser suficiente, y se requerirá más cantidad de aire fresco (segundo ventilador, de 12V). Así, al disponer de dos ventiladores, se puede representar de forma más eficaz la presencia de una ventilación primaria y otra auxiliar, así como el beneficio en eficiencia y seguridad de usar esta última según las circunstancias.

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZADO

4.3.1 Objetivo del sistema

El sistema tiene como objetivo activar una ventilación auxiliar de forma automática cuando se detectan ciertas condiciones ambientales umbrales. También generará alertas visuales y sonoras en señal de peligro.

4.3.2 Características de los componentes usados

El dispositivo está compuesto por una placa base portable, pantalla LCD, sensores MQ-2, sensor DHT11, un PIR, ventiladores, buzzers y diodos LED. A continuación, se procede a describir las principales características de los diferentes elementos utilizados.

- Placa Elegoo Mega 2560

La placa base portable será una ELEGOO Mega 2560 R3 con microprocesador basada en el Arduino Mega con USB cable, con 16 MHz y un AVR de 8 bits. Este dispositivo es compatible con Arduino IDE y emplea un código de C++. Esta placa será portable y, aunque trabaja ya a 5V, en este caso lo hará a 12V. Cuenta con 54 pines digitales y 16 entradas analógicas que pueden cumplir diferentes funciones. Tiene un tamaño de 101.5 mm x 53.3 mm y un peso de unos 37 gramos. Además, cuenta con una memoria de 256 KB flash, 8 KB SRAM, lo que hace que sea capaz de realizar simultáneamente diferentes tareas.

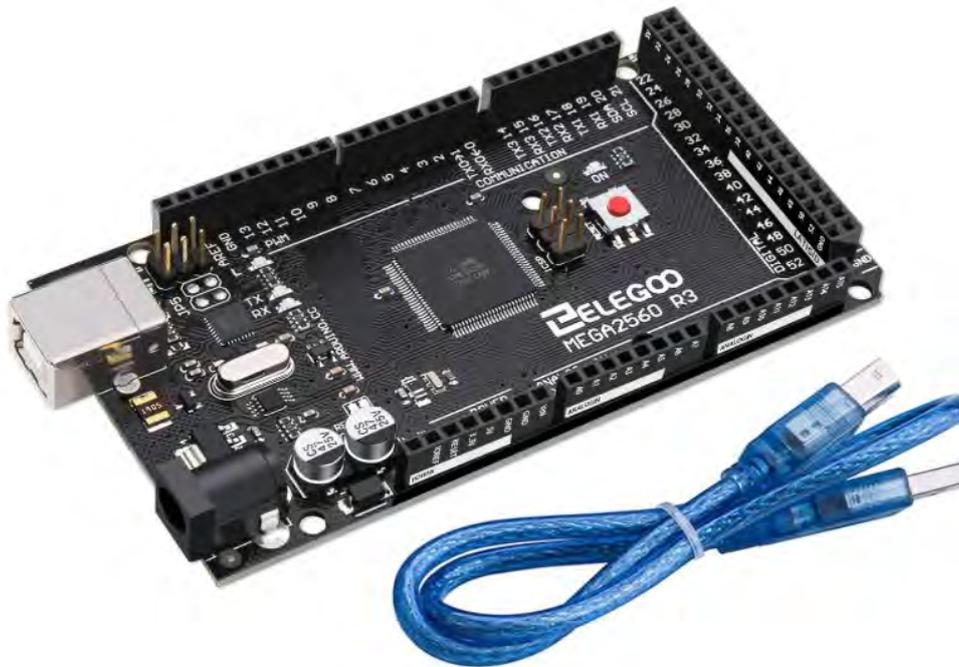


Figura 4.2: Placa Elegoo Mega elegida

- Pantalla LCD

La pantalla LCD será una AZDelivery HD44780 de 16x2 (16 caracteres por 2 líneas). Este dispositivo permite mostrar hasta 32 caracteres alfanuméricos y funciona mediante una interfaz paralela que puede operar a 4 u 8 bits.

- Sensor MQ-2

El sensor MQ-2 es un sensor semiconductor de gases, que detecta una gran variedad de ellos, como el humo, propano, metano, butano, hidrógeno, monóxido de carbono o alcohol. Funciona a 5V DC y entre -20°C y 50°C. Tiene un tamaño de unos 20mm x

Cuadro 4.1: Ficha técnica del sensor MQ-2

Parámetro	Valor
Tipo de sensor	Semiconductores (Gas)
Gases detectados	LPG, propano, metano, alcohol, hidrógeno, humo
Voltaje de alimentación	5 V DC
Consumo de corriente	150 mA (máx.)
Resistencia del calentador (RH)	33 Ω \pm 5 %
Tensión de calefacción (VH)	5 V \pm 0.2 V
Tiempo de calentamiento	24 h para estabilidad óptima
Temperatura de operación	-20 °C a 50 °C
Humedad relativa	5 % – 95 % RH (sin condensación)
Tiempo de respuesta	menor a 10 s
Sensibilidad ajustable	Sí (mediante potenciómetro)
Salida de señal	Analógica y digital (con comparador)
Dimensiones	Aprox. 32 x 22 x 27 mm

- Sensor DHT11 Por otro lado, el sensor DHT11 mide tanto la humedad como la temperatura. Este dispositivo devuelve los resultados a través de un pin digital y tiene una frecuencia de trabajo de 1Hz. Su tamaño es de aproximadamente 23mm x 12mm x 5mm, con un peso de 3g. Tiene una alta fiabilidad además de un bajo consumo.

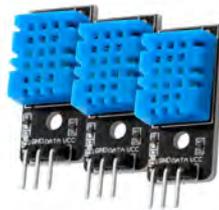


Figura 4.5: Sensor DHT11

- Sensor PIR El sensor PIR HC-SR501 detects movimiento humano por radiación térmica, dando por tanto dos salidas digitales (1- hay presencia y 0- no hay presencia). Tiene un rango de detección de hasta 6.5 metros y un tiempo de retardo ajustable, desde 0.3 segundos hasta 5 minutos.



Figura 4.6: Sensor PIR

- Ventiladores El ventilador ARCTIC F12 120mm es de tipo axial, comunmente utilizado en ordenadores. Tiene unas dimensiones de 120mm x 120mm x 25mm, y emplea un

voltaje de 12V DC, con un consumo aproximado de 0.2A. Consta de 3 pines y llega a generar un caudal de aire de 53 CFM, con un ruido considerablemente bajo. Por otro



Figura 4.7: Ventilador Arctic 12V

lado, se emplea también un ventilador 5V DC de 40mm x 40mm x 10mm, también de tipo axial.



Figura 4.8: Ventilador 5V

- **Módulo de Relés** Como se explica en el apartado ??
En este caso se usa un Elegoo 5V DC módulo de relé de 4 canales, que puede controlar hasta 4 dispositivos diferentes. Tiene una tensión de control de 5V que lo hace compatible con Arduino.



Figura 4.9: Módulo de relés de 4 canales

- **Otros** Además de estos dispositivos, se emplean otros más comunes como una portboard, resistencias, leds o cables dupont.

4.3.3 Diagramas del sistema

Para comprender el funcionamiento y la estructura del sistema automatizado diseñado, se presentan a continuación dos representaciones gráficas fundamentales: el diagrama de bloques y el diagrama de flujo. Estas herramientas permiten visualizar tanto la arquitectura física del sistema como la lógica de su funcionamiento interno.

El **diagrama de bloques** proporciona una vista general de los componentes principales del sistema describe cómo se interconectan entre sí. Esta representación ayuda a entender la estructura del montaje físico y la distribución de señales y energía.

La Figura 4.10 muestra el diagrama de bloques del sistema de control basado en la placa **Elegoo Mega 2560**, el cual integra sensores, actuadores y módulos de control para la gestión automatizada de ventilación en un entorno simulado de monitoreo ambiental o minero.

El sistema cuenta con **tres sensores de entrada**:

- **DHT11**: mide temperatura y humedad.
- **MQ-2**: detecta la concentración de gases y humo.
- **PIR**: detecta presencia o movimiento humano.

Las señales captadas por estos sensores son procesadas por la placa Mega, que genera salidas digitales en función de ciertas condiciones programadas:

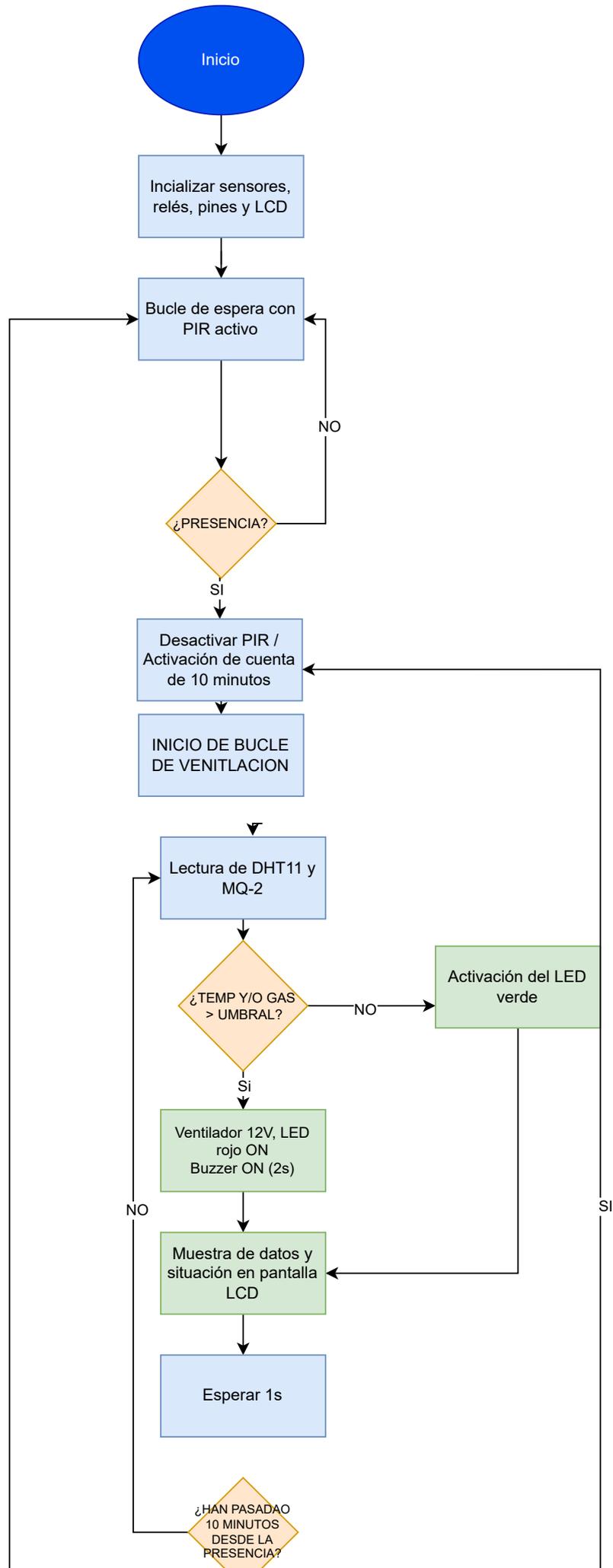
- Si se detecta presencia, se activa un **ventilador de 5V** mediante un **transistor NPN**, funcionando durante un tiempo definido.
- Si se superan ciertos umbrales de temperatura o gas, se activa un **ventilador de 12V** alimentado por fuente externa, a través de un **módulo de relé de 4 canales**.

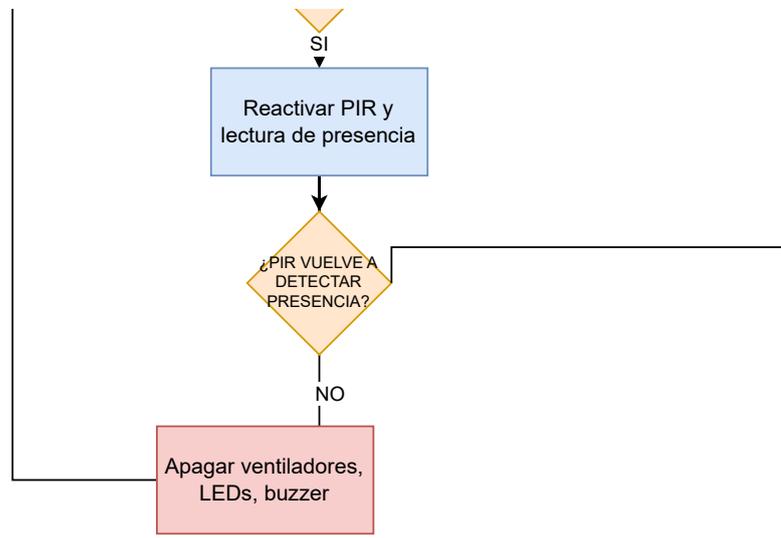
Además, se implementan **señales de estado**:

- Un **LED verde** indica funcionamiento normal.
- Un **LED rojo** y un **buzzer** se activan en caso de alerta.
- Una **pantalla LCD** muestra en tiempo real los valores leídos por los sensores y el estado del sistema.

Se emplean dos fuentes de alimentación (5V y 12V), con una masa común (GND compartida), garantizando coherencia entre las referencias de señal del sistema. El diagrama también incluye etiquetas que describen las funciones de cada conexión, facilitando la comprensión de la lógica de control.

Por otro lado, el diagrama de flujo representa el comportamiento lógico del sistema mediante una secuencia de acciones y decisiones. A través de este esquema, se ilustra el ciclo de funcionamiento programado, desde la detección de presencia hasta la activación de los mecanismos de ventilación y alerta.





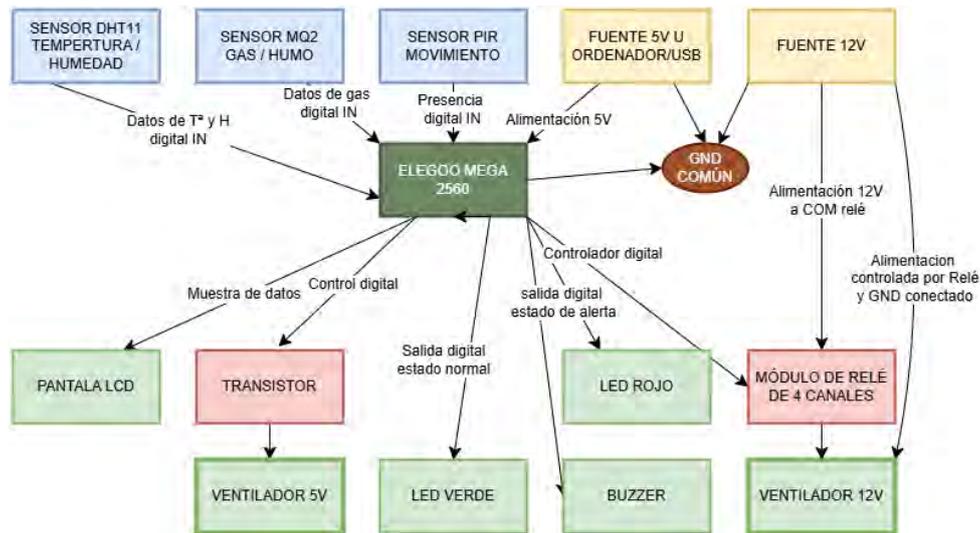


Figura 4.10: Diagrama de bloques

4.3.4 Código de Arduino IDE

Para el correcto funcionamiento del sistema es necesario escribir el código correcto en Arduino IDE. Este programa utiliza el código C++.

Antes de desarrollar el código completo y final, y a fin de comprobar el correcto funcionamiento de todos los elementos, se escriben códigos mas breves que se ejecutan en el microcontrolador. Así, se puede ver si los componentes funcionan correctamente de forma individual, para pasar a hacerlos funcionar de forma conjunta.

Todos los códigos son publicados en abierto en el repositorio europeo de Zenodo, con el acceso en el anexo A.0.2, por Juan Arruzas [13].

Por un lado se comprueba el correcto funcionamiento de los sensores. En primer lugar se escribe el siguiente código comprobando el correcto funcionamiento del sensor MQ-2.

```

1 #define MQ-2_PIN A0 // Se define el pin
2
3 void setup() {
4   Serial.begin(9600); //Se comienza
5   pinMode(MQ-2_PIN, INPUT); //Se define el pin como entrada
6 }
7
8 void loop() {
9   int sensorValue = analogRead(MQ-2_PIN);
10
11   Serial.println(sensorValue); // Se muestra solo el valor,
    sin texto
12
13   delay(100); //Retardo breve para lectura de datos continua
14 }

```

```

temperatrui.ino
1  int mq2Pin = A0; // Se define el pin del sensor
2
3  void setup() {
4    Serial.begin(9600); // Inicia la comunicación serial
5    pinMode(mq2Pin, INPUT); // Configura el pin elegido como entrada
6  }
7
8  void loop() {
9    int sensorValue = analogRead(mq2Pin); // Se realiza la lectura analógica (entre 0-1023)
10
11   // Se imprime en formato compatible con Serial Plotter, para visualizar los datos en una gráfica
12   Serial.print("MQ2: ");
13   Serial.println(sensorValue);
14
15   delay(100); // Menor retraso para mejor visualización en el gráfico
16 }
17

```

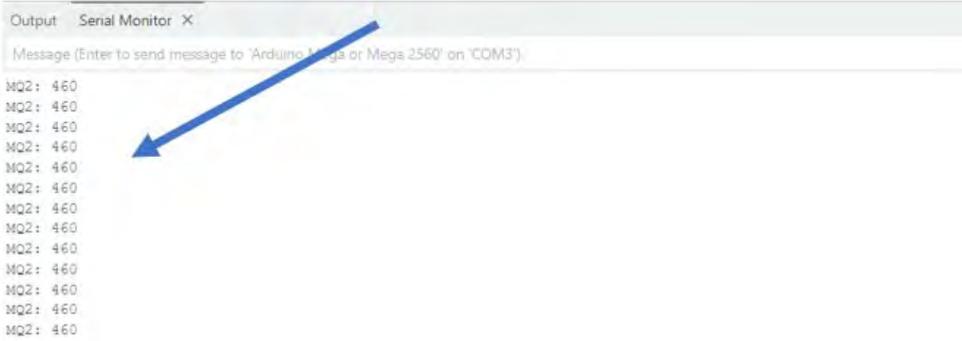


Figura 4.11: Código y salida de valores digital del MQ-2



Figura 4.12: Valores gráficos del MQ-2

En la figura 4.12, se puede observar una gráfica con valores en el eje Y entre 376 y 379. Estos valores corresponden con las lecturas en ppm del MQ-2 de cantidad de gas. Por cada lectura [en la foto se ve que van 3363 (eje x)] se tiene un valor, y este queda representado en la gráfica de forma continua.

Para comprobar la eficacia del sensor, se expande alcohol sanitario cerca, de tal forma que el sensor deberá detectar más gases.

Como se observa en la figura 4.13, hay un aumento considerable de la concentración en un breve periodo de tiempo (10 segundos), por lo que parece que el sensor MQ-2 funciona correctamente.

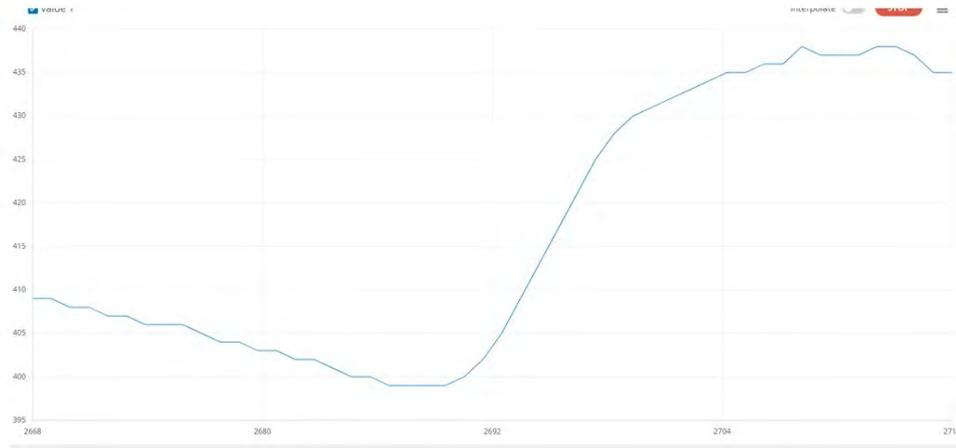


Figura 4.13: Captura del incremento de la concentración de gas etanol en tiempo real por el autómatas mediante el MQ-2

Se continúa haciendo la prueba del DHT11, y juntando nuevamente una fuente de calor una vez activado. Se escribe el siguiente código y se ejecuta:

```

1 #include <DHT.h>
2
3 #define DHTPIN 7          // Se elige un pin digital de datos
   del DHT11
4 #define DHTTYPE DHT11   // Se define que es un DHT11
5
6 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
7
8 void setup() {
9     Serial.begin(9600);   // Inicia la comunicaci n
10    dht.begin();          // Inicia el sensor DHT
11 }
12
13 void loop() {
14     float humedad = dht.readHumidity();
15     float temperatura = dht.readTemperature(); //
16
17     // Validar lectura
18     if (isnan(humedad) || isnan(temperatura)) {
19         Serial.println("0\t0"); // En caso de error, evita
   fallos en el plotter
20     } else {
21         Serial.print(temperatura);
22         Serial.print("\t"); // Separador para el plotter
23         Serial.println(humedad); // En la misma linea se
   muestra el valor de humedad
24     }
25
26     delay(2000); // Retardo de 2 segundos entre lecturas
27 }

```

29.10	51.00
29.90	51.00
29.00	51.00
29.00	51.00
29.90	51.00
29.30	51.00
29.80	51.00
29.30	51.00
29.60	51.00
29.50	51.00
29.30	51.00
29.10	51.00
29.50	51.00

Figura 4.14: Valores digitales del dht11

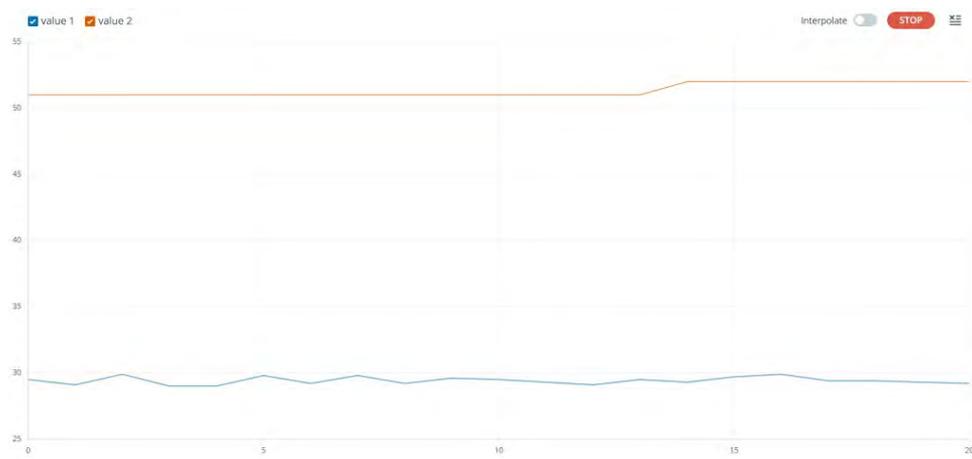


Figura 4.15: Valores gráficos del DHT11

En las figuras 4.14 y 4.15 se pueden ver los valores de salida dados por el automata a través de las lecturas del DHT11. Por un lado se tienen los valores digitales, con valores de unos 29° para la temperatura y 51% para la humedad. De la misma forma, estos se muestran gráficamente, correspondiendo la línea azul o valor 1 con la T^a, y el naranja o 2 con la humedad. Una vez escrito y ejecutado, se enciende un mechero a su lado para comprobar si se produce una variación de humedad y temperatura.

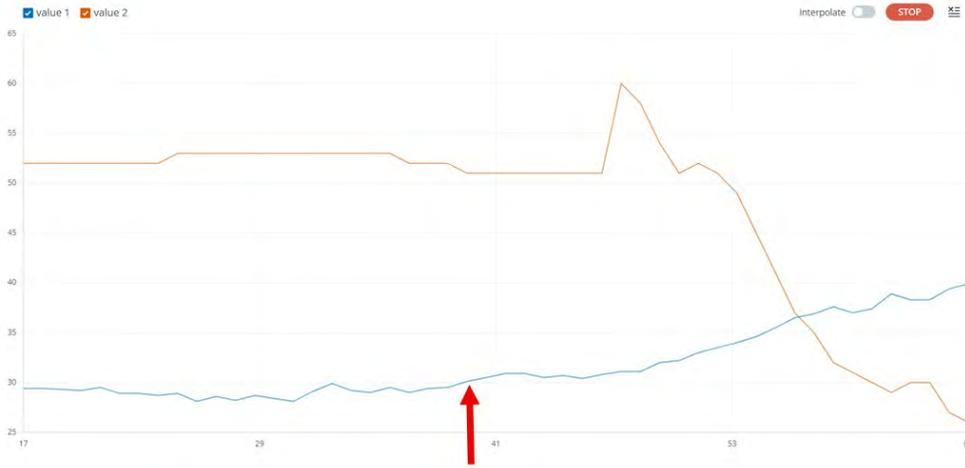


Figura 4.16: Aumento de temperatura y bajada de humedad al acercarse a fuente de calor

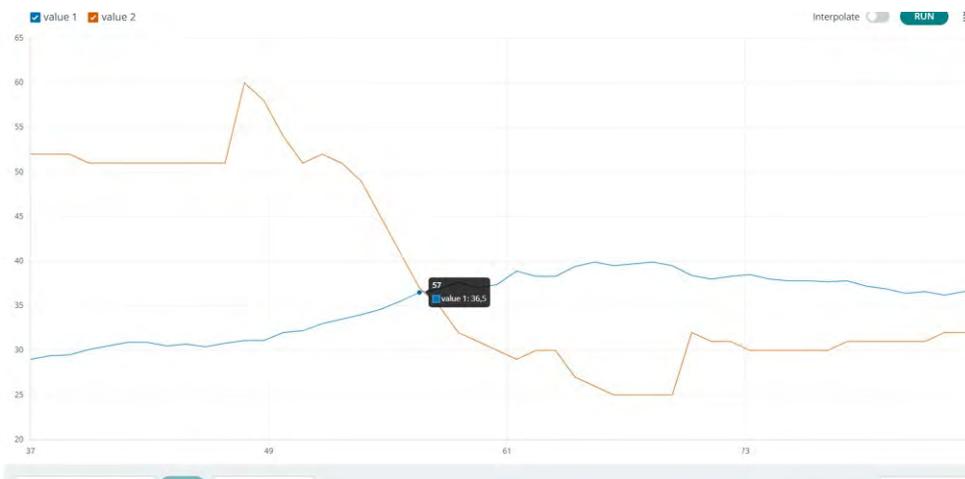


Figura 4.17: Variación al alejarse la fuente de calor, y punto de encuentro entre temperatura y humedad

En las figuras 4.16 y 4.17 se pueden ver que las lecturas de los valores son correctas. En la primera de ellas se ve como entre las lecturas 48 y 66 hay un aumento de hasta 13°. Posteriormente, en la siguiente imagen, se ve como al apagar la fuente de calor este se va disipando y comienza a disminuir.

Además, en la figura 4.17, se ve claramente como a medida que la temperatura aumenta (línea azul o valor 1), la humedad varía de forma contraria (línea naranja o valor 2). Esto prácticamente confirma que ambas lecturas son correctas, pues al calentarse el aire y el entorno del sensor, el aire se seca, pues el calor disipa la humedad.

Por otro lado se comprueba el funcionamiento del ventilador de 5V. Se decide montarlo ya junto con los sensores, pues se sabe que estos funcionan. Para ello se escribe un código que lea los datos de los sensores, y cuando estos superen ciertos umbrales (elegidos en función del momento del montaje); se activa el ventilador, y cuando sean menores se para.

```
1 #include <DHT.h>
2
3 // Se definen todos los pines
4 #define DHTPIN 2
5 #define DHTTYPE DHT11
6 #define MQ-2PIN A0
7 #define FAN_PIN 8
8
9 // Sensor
10 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
11
12 // Umbral y contador
13 float tempThreshold = 27.0; //Se establece el umbral para
    el momento en el que se ejecuta
14 int readingCounter = 0;
15 int fanState = 0; // 0 = apagado, 300 = encendido, para
    que se vea claramente en la grafica
16
17 void setup() {
18     Serial.begin(9600);
19     dht.begin();
20     pinMode(FAN_PIN, OUTPUT);
21     Serial.println("Temp\tHumidity\tGas\tFan");
22 }
23
24 void loop() {
25     // Lectura sensores
26     float temperatura = dht.readTemperature();
27     float humedad = dht.readHumidity();
28     int gas = analogRead(MQ-2PIN);
29
30     // Mostrar en la grafica las lecturas
31     Serial.print(temperatura); Serial.print("\t");
32     Serial.print(humedad);      Serial.print("\t");
33     Serial.print(gas);          Serial.print("\t");
34     Serial.println(fanState);
35
36     readingCounter++;
37
38     // Cada 10 lecturas evaluar temperatura y en caso de
        pasar el umbral se actvia
39     if (readingCounter >= 10) {
40         if (temperatura > tempThreshold) {
41             fanState = 300;
42             digitalWrite(FAN_PIN, HIGH);
43
44             // Durante 8 segundos, seguir leyendo y mostrando
```

```

    fanState = 300
45  for (int i = 0; i < 4; i++) {
46      float tempDuringFan = dht.readTemperature();
47      float humDuringFan = dht.readHumidity();
48      int gasDuringFan = analogRead(MQ-2PIN);
49
50      Serial.print(tempDuringFan); Serial.print("\t");
51      Serial.print(humDuringFan); Serial.print("\t");
52      Serial.print(gasDuringFan); Serial.print("\t");
53      Serial.println(fanState);
54
55      delay(2000); // Mantener intervalo
56  }
57
58      digitalWrite(FAN_PIN, LOW);
59      fanState = 0;
60  }
61
62      readingCounter = 0;
63  }
64
65  delay(2000); // Esperar 2 segundos
66  }
```

Este código permite comprobar fácilmente el correcto funcionamiento del ventilador en función de los valores de los sensores. Se decide, por ser el parámetro más manejable, poner un umbral de temperatura de 27° (elegido en función de las condiciones del momento). Cuando los sensores lean un valor de temperatura mayor que 27, se activará el ventilador por 2 segundos. Durante 8 segundos se seguirán haciendo lecturas, y si pasado ese tiempo la temperatura vuelve a ser de mayor de 27, se vuelve a activar por 2 segundos. Este código permite ver como funcionaría un sistema monitorizado y con respuestas cada cierto tiempo, no continuas. En la figura 4.18, se observan las lecturas de

- Humedad (naranja)
- Cantidad de gases (verde)
- Temperatura (azul)
- Estado del ventilador (amarillo, 0 indica apagado y 300 encendido)

Por otro lado, en la figura 4.19, se observa como se activa el ventilador (su valor pasa a 300) durante sólo 2 segundos al leer más de 27 grados cada 8 segundos.

Se modifica el código para que, al pasar ahora de 28°, se active el ventilador, y este no pare hasta bajar la temperatura. Si esta vuelve a pasar e umbral establecido de 28, volverá a funcionar, siendo así un sistema automático. El código será el siguiente:



Figura 4.18: Gráfica con las lecturas del DHT11, MQ-2 y estado del ventilador

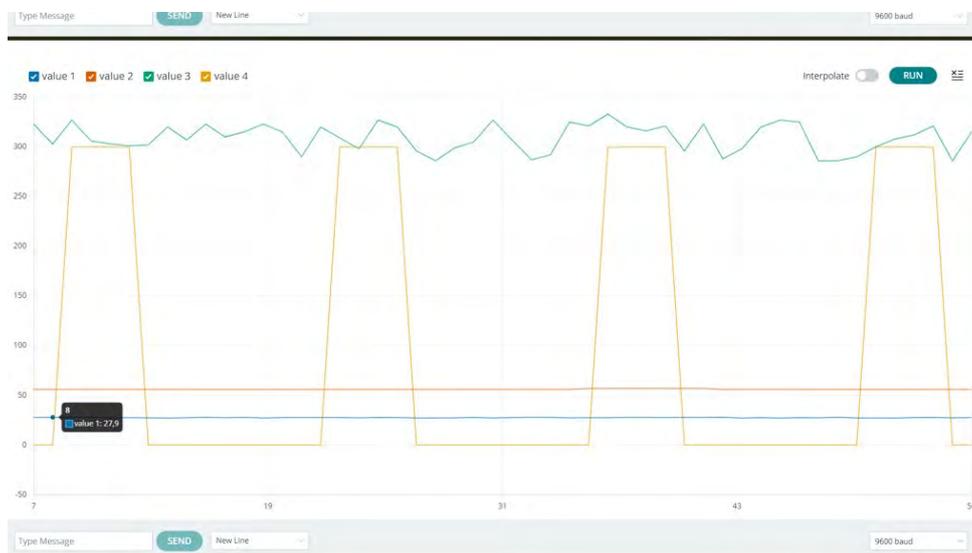


Figura 4.19: Activación del ventilador al leer más de 27° cada 8 segundos

```

1 #include <DHT.h>
2
3 // Se definen los pines para cada componente
4 #define DHTPIN 2
5 #define DHTTYPE DHT11
6 #define MQ_2PIN A0
7 #define FAN_PIN 8
8
9 // Sensor
10 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
11
12 // Umbral
13 float tempThreshold = 28.0; //Nuevo umbral
14 int fanState = 0; // En la grafica, el valor 0 = apagado y
    300 = encendido, para visualizar facilmente el estado

```

```
del ventilador
15
16 void setup() {
17   Serial.begin(9600);
18   dht.begin();
19   pinMode(FAN_PIN, OUTPUT);
20   Serial.println("Temp\tHumidity\tGas\tFan");
21 }
22
23 void loop() {
24   // Lectura de sensores
25   float temperatura = dht.readTemperature();
26   float humedad = dht.readHumidity();
27   int gas = analogRead(MQ-2PIN);
28
29   // Control de ventilador en tiempo real
30   if (temperatura >= tempThreshold) {
31     digitalWrite(FAN_PIN, HIGH);
32     fanState = 300;
33   } else {
34     digitalWrite(FAN_PIN, LOW);
35     fanState = 0;
36   }
37
38   // Mostrar valores en el plotter
39   Serial.print(temperatura); Serial.print("\t");
40   Serial.print(humedad);      Serial.print("\t");
41   Serial.print(gas);          Serial.print("\t");
42   Serial.println(fanState);
43
44   delay(2000); // Esperar 2 segundos antes del siguiente
45   ciclo
}
```

Se comprueba en las figuras 4.21 y 4.20 el ventilador se activa y está en funcionamiento hasta que la temperatura no baja de los 28° antes elegidos como umbral. Ambas figuras corresponden al mismo momento de lectura, pero una en forma gráfica y otra en forma digital.



Figura 4.20: Visualización gráfica del funcionamiento del ventilador siempre que la Tª supere el umbral

27.00	58.00	290	0
27.80	58.00	296	0
27.30	58.00	286	0
27.10	58.00	304	0
27.30	62.00	299	0
27.30	62.00	319	0
28.30	60.00	303	300
28.70	60.00	327	300
28.80	59.00	296	300
28.80	58.00	298	300
28.30	57.00	311	300
28.70	57.00	302	300
28.70	56.00	292	300
28.70	56.00	308	300
28.90	55.00	303	300
28.20	55.00	298	300
28.90	54.00	296	300
28.20	53.00	337	300
28.60	53.00	311	300
28.00	53.00	298	300
28.20	53.00	301	300
28.80	53.00	337	300
28.30	54.00	329	300
28.20	54.00	298	300
27.40	55.00	300	0
27.00	55.00	292	0
27.70	55.00	327	0
27.00	55.00	288	0
27.70	55.00	327	0
27.00	55.00	290	0

Figura 4.21: Visualización digital del funcionamiento del ventilador siempre que la Tª supere el umbral

Se añaden ahora los LEDs y el Buzzer, que, en función de la situación de la temperatura, se encenderán o no.

```

1 #include <DHT.h>
2 //se define cada pin
3 #define DHTPIN 3
4 #define DHTTYPE DHT11
5 #define FAN_PIN 4

```

```
6 #define LED_ROJO 5
7 #define LED_VERDE 6
8
9 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
10
11 void setup() {
12     Serial.begin(9600);
13     dht.begin();
14
15     pinMode(FAN_PIN, OUTPUT);
16     pinMode(LED_ROJO, OUTPUT);
17     pinMode(LED_VERDE, OUTPUT);
18 }
19
20 void loop() {
21     float temperatura = dht.readTemperature();
22
23     // Verificar si la lectura fue exitosa
24     if (isnan(temperatura)) {
25         Serial.println("Error al leer del sensor DHT11");
26         return;
27     }
28
29     Serial.print("Temperatura: ");
30     Serial.print(temperatura);
31     Serial.println(" C ");
32
33     if (temperatura > 27.0) {
34         digitalWrite(FAN_PIN, HIGH);
35         digitalWrite(LED_ROJO, HIGH);
36         digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
37     } else {
38         digitalWrite(FAN_PIN, LOW);
39         digitalWrite(LED_ROJO, LOW);
40         digitalWrite(LED_VERDE, HIGH);
41     }
42
43     delay(1000); // Esperar 1 segundo
44 }
```

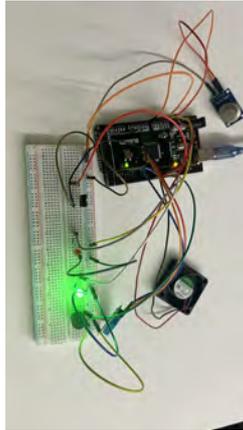


Figura 4.22: Pausa de ventilador y activación del LED al bajar del umbral

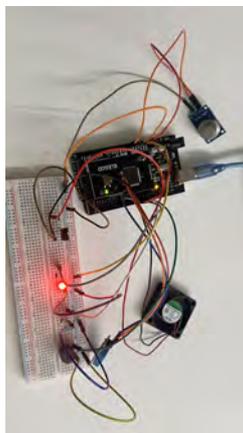


Figura 4.23: Activación de ventilador, buzzer y LED rojo al pasar umbral

Por último, se monta el ventilador de 12V por ser el mas complejo al requerir otra fuente de alimentación y el módulo de relés. Se escribe un código que lo ponga en marcha cada 10 segundos durante 2 y se comprueba su eficacia.

```
1 #define RELAY_PIN 8 // Pin conectado al IN del modulo de
   rele
2
3 void setup() {
4   pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
5   digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Asegura que comienza
   apagado
6   Serial.begin(9600);
7   Serial.println("Sistema de prueba de ventilador 12V
   iniciado.");
8 }
9
10 void loop() {
11   Serial.println(" Esperando 10 segundos...");
12   delay(10000); // Espera 10 segundos
13
14   Serial.println(" Activando ventilador por 2 segundos.");
15   digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Activa rele (enciende
   ventilador)
16   delay(2000); // Ventilador encendido
   por 2 segundos
17
18   digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Apaga ventilador
19   Serial.println(" Ventilador apagado.");
20 }
```

Finalmente, se escribe el código completo, modificando y combinando los anteriores. Se ejecuta y se comprueba si su funcionamiento es correcto. De este modo el ventilador de 5V funcionaría siempre que se detecte presencia, y la ventilación auxiliar y se activará, en función de los valores dados, el ventilador de 12V como auxiliar. se añadirán los buzzers y LEDs correspondientes y el sensor PIR.

Se añade también una pantalla de carga con el nombre de la escuela, del autor, tutor o la fecha en la pantalla LCD

```
1 #include <DHT.h>
2 #include <Wire.h>
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4 \\se incluyen los paquetes necesarios
5 #define DHTPIN 3
6 #define DHTTYPE DHT11
7 #define MQ2_PIN A0
8 #define PIR_PIN 4
9 #define RELAY_PIN 8
10 #define LED_ROJO 5
11 #define LED_VERDE 6
12 #define BUZZER_PIN 7
13 //se definen los pines de cada componente
14 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

```

15 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); \\se define el tama o
    del lcd para que funcione el paquete
16
17 bool buzzerActivo = false;
18 unsigned long buzzerInicio = 0;
19 const unsigned long DURACION_BUZZER = 2000;
20 const unsigned long INTERVALO_LECTURA = 600000;
21 \\se definen variables
22 bool sistemaActivo = false;
23 unsigned long ultimaLectura = 0;
24 \\debe haber presencia para comenzar
25 void setup() {
26     Serial.begin(9600);
27     dht.begin();
28     lcd.begin(16, 2);
29     lcd.backlight();
30     lcd.clear(); \\ se a ade la pantalla de carga
31     lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(" UNIVERSIDAD ");
32     lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("DE CANTABRIA");
33     delay(2000); lcd.clear(); delay(800);
34
35     lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("EP Ingenieria");
36     lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Minas y Energia");
37     delay(2000); lcd.clear(); delay(800);
38
39     lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Trabajo de Fin");
40     lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("de Grado");
41     delay(2000); lcd.clear(); delay(800);
42
43     lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Convocatoria:");
44     lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Julio 2025");
45     delay(2000); lcd.clear(); delay(800);
46
47     lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Autor: J. Arruzas");
48     lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Tutor: Luis Vejo");
49     delay(3000); lcd.clear(); delay(800);
50
51 //se inicia la lectura
52 pinMode(PIR_PIN, INPUT);
53 pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
54 pinMode(LED_ROJO, OUTPUT);
55 pinMode(LED_VERDE, OUTPUT);
56 pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);
57 //se configuran los sensores, en funcion de si son entradas
    o salidas
58 digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
59 digitalWrite(LED_ROJO, LOW);
60 digitalWrite(LED_VERDE, LOW);

```

```
61  digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
62  //se define como debe empezar cada componente
63  lcd.setCursor(0, 0);
64  lcd.print("Esperando PIR...");
65  Serial.println("Temp, T_Lim, Gas, G_Lim, Mov, V5, V12, V5_STATE,
66  V12_STATE, LED_ROJO_STATE, BUZZER_STATE");
67  }
68
69  void loop() {
70  int movimiento = digitalRead(PIR_PIN);
71  //se define el bucle en funcion de si hay movimiento
72  if (movimiento == HIGH) {
73  if (!sistemaActivo) {
74  sistemaActivo = true;
75  ultimaLectura = millis();
76  lcd.clear();
77  lcd.print("Sistema activo");
78  delay(2000);
79  }
80
81  if (millis() - ultimaLectura >= INTERVALO_LECTURA) {
82  realizarLectura();
83  ultimaLectura = millis();
84  }
85  //se define que pasar si no hay movimiento
86  } else {
87  if (sistemaActivo) {
88  sistemaActivo = false;
89
90  digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
91  digitalWrite(LED_ROJO, LOW);
92  digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
93  digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
94  buzzerActivo = false;
95  }
96
97  lcd.clear();
98  lcd.setCursor(0, 0);
99  lcd.print("Sin presencia");
100  lcd.setCursor(0, 1);
101  lcd.print("Esperando PIR...");
102  delay(2000);
103  }
104
105  delay(500);
106  }
107
108  void realizarLectura() {
```

```
109 float temperatura = dht.readTemperature();
110 int gas = analogRead(MQ2_PIN);
111
112 int ventilador_5v_valor = 10;
113 int ventilador_12v_valor = 0;
114 int estado_v5 = 1;
115 int estado_v12 = 0;
116 int estado_led_rojo = 0;
117 int estado_led_verde = 0;
118 int estado_buzzer = 0;
119
120 bool hayAlarma = (!isnan(temperatura) && (temperatura >
121     27.0 || gas > 500));
122 //nuevo bucle, en funcion de si se supera el umbral o no
123 if (!isnan(temperatura)) {
124     if (hayAlarma) {
125         digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
126         digitalWrite(LED_ROJO, HIGH);
127         digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
128         digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
129
130         ventilador_12v_valor = 15;
131         estado_v12 = 1;
132         estado_led_rojo = 1;
133         estado_led_verde = 0;
134
135         if (!buzzerActivo) {
136             buzzerActivo = true;
137             buzzerInicio = millis();
138         }
139     } else {
140         digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
141         digitalWrite(LED_ROJO, LOW);
142         digitalWrite(LED_VERDE, HIGH);
143         digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
144
145         ventilador_12v_valor = 0;
146         estado_v12 = 0;
147         estado_led_rojo = 0;
148         estado_led_verde = 1;
149         buzzerActivo = false;
150     }
151
152     if (buzzerActivo && millis() - buzzerInicio >=
153         DURACION_BUZZER) {
154         digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
155         buzzerActivo = false;
```

```
155     }
156
157     estado_buzzer = digitalRead(BUZZER_PIN);
158 //se muestran los datos en la lcd
159     lcd.clear();
160     lcd.setCursor(0, 0);
161     lcd.print("T:");
162     lcd.print(temperatura, 1);
163     lcd.print("C TL:27");
164
165     lcd.setCursor(0, 1);
166     lcd.print("G:");
167     lcd.print(gas);
168     lcd.print(" GL:500");
169 //se grafican los datos
170     Serial.print(temperatura);
171     Serial.print(",");
172     Serial.print(27);
173     Serial.print(",");
174     Serial.print(gas);
175     Serial.print(",");
176     Serial.print(500);
177     Serial.print(",");
178     Serial.print(1);
179     Serial.print(",");
180     Serial.print(ventilador_5v_valor);
181     Serial.print(",");
182     Serial.print(ventilador_12v_valor);
183     Serial.print(",");
184     Serial.print(estado_v5);
185     Serial.print(",");
186     Serial.print(estado_v12);
187     Serial.print(",");
188     Serial.print(estado_led_rojo);
189     Serial.print(",");
190     Serial.println(estado_buzzer);
191 }
192 }
```

4.4 MONTAJE DEL PROTOTIPO

El montaje del prototipo o maqueta tendrá varias partes bien diferenciadas. En primer lugar, la parte superior del prototipo representará la explotación a cielo abierto de la mina. En esta parte se representará una pequeña muestra de cómo se realizó la explotación a cielo abierto, representando una pequeña cantera. A demás, contará con el pozo de acceso para la ventilación y el pozo de aire viciado por otro lado, una caseta que representa el control y un panel de control que representará las distintas cosas que se pretenden demostrar con el sistema de automatización. Contará con leds que en función del color que emitan indicarán una situación y otra de la mina. Estos quedarán bien definidos en el propio panel. Contará también con buzzers o sonadores que en el caso de encontrarse en malas condiciones sonarán. Esta parte se realizará empleando planchas de porexpan cortadas a la medida deseada. Se exponen a continuación los planos utilizados. Estas planchas serán recubiertas con una masilla y posteriormente pintadas buscando que la representación visual sea lo más llamativa posible y pueda acompañar la funcionalidad del prototipo. Por otro lado, se tiene la parte que se pretende automatizar que corresponde a la mina subterránea.



Figura 4.24: Parte superior durante el montaje

Esta mina contará con tres galerías principales y algún conducto auxiliar para que circule la ventilación o por el que puede circular el material ya extraído.

De arriba para abajo, la primera galería se estará abandonada y en la segunda y tercera se estará trabajando. A la izquierda se tratará de representar la zona mineralizada que se está explotando.



Figura 4.25: Esquema de una galería

Contará además con el pozo de acceso por donde circulará el equipo y por donde entrará la ventilación. Mirando el prototipo de frente, a la derecha saldrá el pozo de aire viciado que estará conectado con las galerías ya mencionadas y por el que circulará, como se ha dicho, el aire viciado. Esta parte del prototipo se desarrollará mediante el diseño CAD e impresión 3D.



Figura 4.26: Pieza recién impresa con soporte

Se procederá, una vez impresas todas las piezas, a su montaje, juntándolo con la parte superior. Una vez se tiene todo montado, se procederá a incluir y soldar los materiales necesarios para el proceso de automatización, como los sensores de gases MQ-2, los sensores de humedades TH11, los sensores de presencia PIR, la placa de Arduino, los ventiladores, los relés o el propio panel de control.

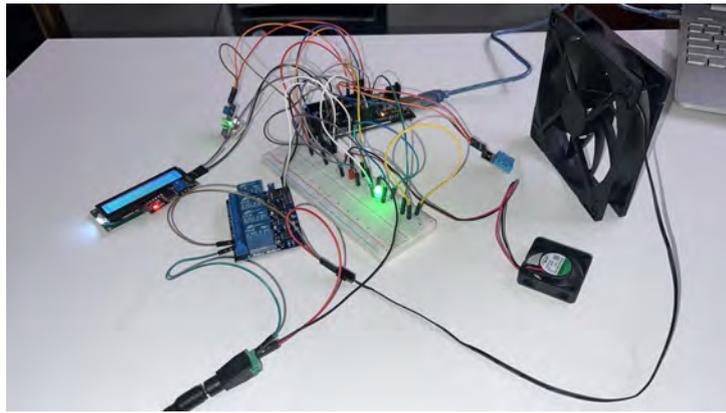


Figura 4.27: Sistema instalado con Arduino

En la figura 4.27 se puede ver como se dispone el montaje de los componentes electrónicos. Se plantea crear un esquema eléctrico para visualizar claramente como se encuentra cada conexión, pero debido al alto número de cables se decide explicar componente a componente. Se debe tener en cuenta que los pines a los que se conecta en la placa de arduino son variables y que dependen del código usado.

- **DHT11 (Sensor de Temperatura y Humedad)**

Cuadro 4.2: Conexiones del DHT11

Pin del DHT11	Pin Arduino MEGA
DATA	Pin 3
VCC	5V
GND	GND

- **MQ2 (Sensor de Gas)**

Cuadro 4.3: Conexiones del MQ2

Pin del MQ2	Pin Arduino MEGA
A0	A0
VCC	5V
GND	GND

- **Sensor PIR (Movimiento)**

Cuadro 4.4: Conexiones del sensor PIR

Pin del PIR	Pin Arduino MEGA
OUT	Pin 4
VCC	5V
GND	GND

- **Pantalla LCD 16x2 con módulo I2C**

Cuadro 4.5: Conexiones del módulo LCD I2C

Pin del I2C	Pin Arduino MEGA
SDA	Pin 20
SCL	Pin 21
VCC	5V
GND	GND

Cuadro 4.6: Conexiones del módulo relé

Pin del Relé	Pin Arduino MEGA
IN	Pin 8
VCC	5V
GND	GND

Cuadro 4.7: Conexiones del LED rojo

Pin del LED	Pin Arduino MEGA
Ánodo (+)	Pin 5 (con resistencia)
Cátodo (-)	GND

- **Módulo Relé (1 canal)**
- **LED Rojo (Alarma)**
- **LED Verde (Estado normal)**

Cuadro 4.8: Conexiones del LED verde

Pin del LED	Pin Arduino MEGA
Ánodo (+)	Pin 6 (con resistencia)
Cátodo (-)	GND

- **Buzzer**

Cuadro 4.9: Conexiones del buzzer

Pin del Buzzer	Pin Arduino MEGA
+	Pin 7
-	GND

- **Ventilador 5V (Encendido constante)**

Cuadro 4.10: Conexiones del ventilador de 5V

Cable del Ventilador	Conexión
+	5V
-	GND

- **Ventilador 12V (Controlado por relé)**

Cuadro 4.11: Conexiones del ventilador de 12V

Cable del Ventilador	Conexión
+	NO del relé
-	GND de fuente externa
COM del relé	+12V fuente externa

4.5 COMPROBACIÓN FINAL DEL SISTEMA

Tras definir el código definitivo al final del capítulo 4.3.4 y explicar como se realiza el montaje, se comprueba si el sistema funciona correctamente.

Al ejecutar el programa, aparecen en primer lugar las pantallas de carga definidas en el código definitivo del apartado 4.3.4.



Figura 4.28: Primera pantalla del programa



Figura 4.29: Segunda pantalla del programa

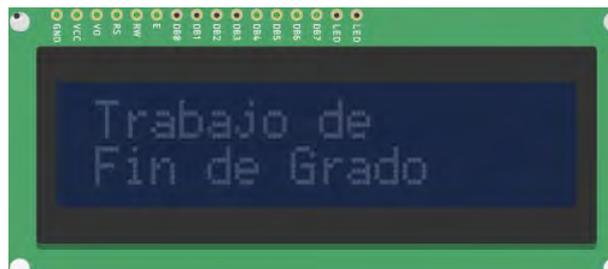


Figura 4.30: Tercera pantalla del programa



Figura 4.31: Cuarta pantalla del programa



Figura 4.32: Quinta pantalla del programa lista de datos del sistema

Posteriormente, se muestran los resultados en caso de presencia. Se realizan pequeñas modificaciones en los valores de los ventiladores cuando están activados para visualizarlos de forma clara en las gráficas 4.34, 4.35 y 4.36 (150 para el ventilador principal y 200 el auxiliar). Sin embargo, el código real no cuenta con dichas modificaciones y corresponde con el mostrado anteriormente en el apartado 4.3.4.

Se obtienen así, en primer lugar, los resultados de las figuras 4.33 y 4.34. En ellos se puede observar una serie de datos, como la temperatura en tiempo real en °C, la cantidad de gas en ppm y los valores límites elegidos en el momento. Por otro lado, aparece el valor de los ventiladores.

Temperatura: 26.10	Gas: 302	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.70	Gas: 331	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.70	Gas: 302	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.20	Gas: 336	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.20	Gas: 340	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.80	Gas: 339	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.80	Gas: 315	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 310	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 320	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 337	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 304	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 303	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 302	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 304	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.50	Gas: 316	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.40	Gas: 337	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.40	Gas: 323	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.70	Gas: 319	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.70	Gas: 331	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.20	Gas: 302	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.20	Gas: 312	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.70	Gas: 302	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.70	Gas: 317	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500
Temperatura: 26.10	Gas: 306	V5: 150 V12: 0	T_Limite: 27	G_Limite: 500

Figura 4.33: Primera lista de datos del sistema

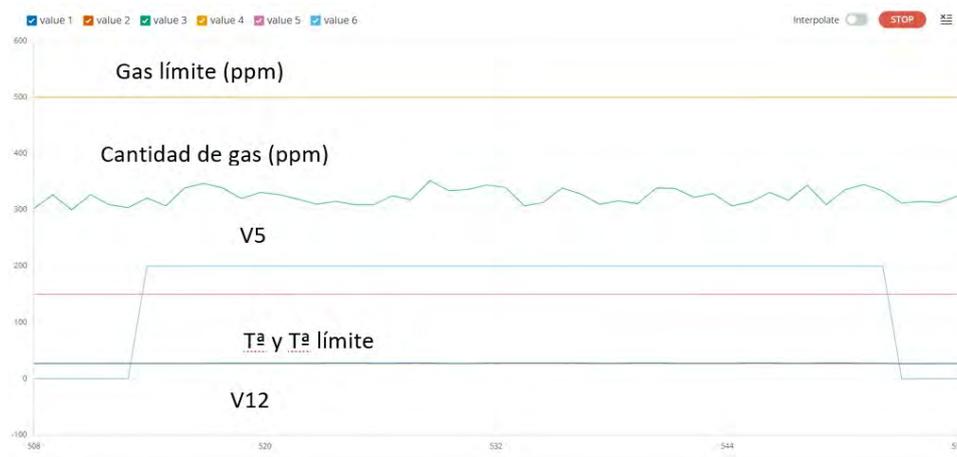


Figura 4.34: Visualización gráfica de la primera lista

En la figura 4.33, se puede apreciar que el ventilador V5 (el principal, de 5V), mantiene un valor constante de 150. Esto indica que se encuentra encendido. Por el contrario, el V12 (o auxiliar, de 12V), tiene un valor de 0, por lo que está desactivado.

Esto es coherente pues, como se puede comprobar, en todo momento se está por debajo de los valores límite.

Sin embargo, en la figura 4.34, se aprecia como el ventilador de 12V pasa de estar en 0 (apagado) a estar en 200 (encendido), y posteriormente vuelve a estar apagado. Esto demuestra que el funcionamiento es correcto, pues se rebasa la t^a umbral de 27° . Sin embargo, en esta figura no se ve con claridad ese sobrepaso, por lo que se realiza a continuación una modificación para mostrar solo los datos de T^a y comprobarlo mejor.

El programa sigue funcionando de la misma forma, solo que gráficamente no se muestran los valores de gas. En la figura 4.35, la línea azul corresponde con la temperatura real, la naranja con la límite y las verde y roja con el ventilador principal y auxiliar, respectivamente.

Cabe destacar las variaciones del ventilador auxiliar, que se activa y desactiva constantemente. Esto se debe a que la temperatura se encuentra fluctuando cerca de la zona del umbral, pasándola por momentos.

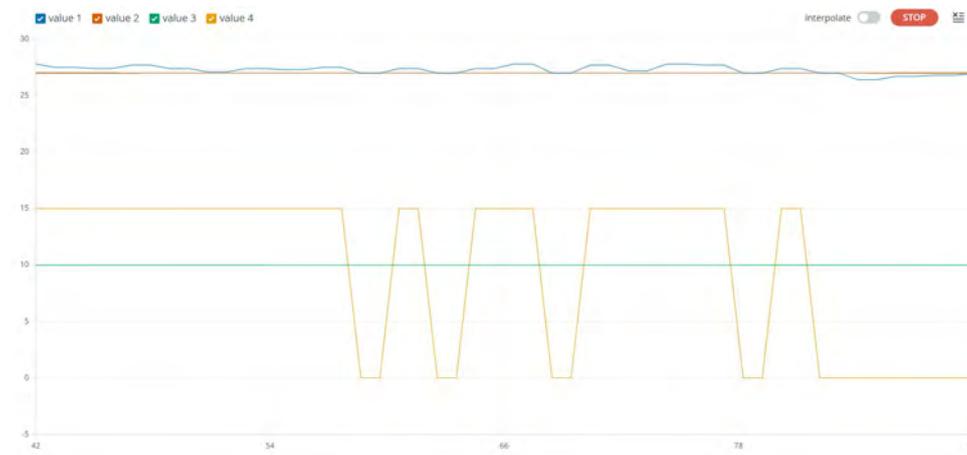


Figura 4.35: Segunda gráfica de datos del sistema

Haciendo una pequeña ampliación, en la figura 4.36, se observa que las paradas del ventilador corresponden a los momentos donde se miden menos de 27° .

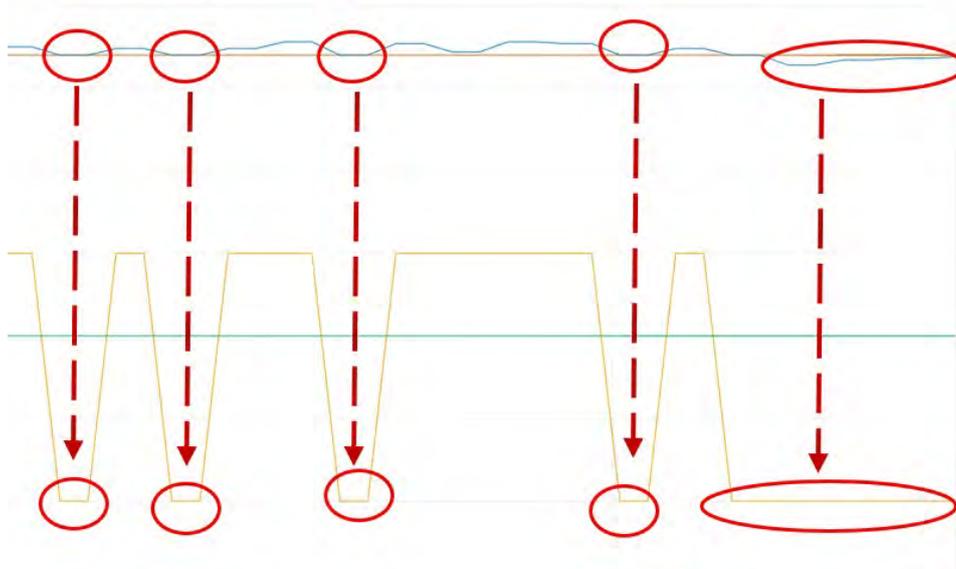


Figura 4.36: Paradas del ventilador auxiliar al subpasar el umbral

Del mismo modo, en la figura 4.37, se muestra claramente como al sobrepasar el umbral se activa de inmediato el ventilador secundario.

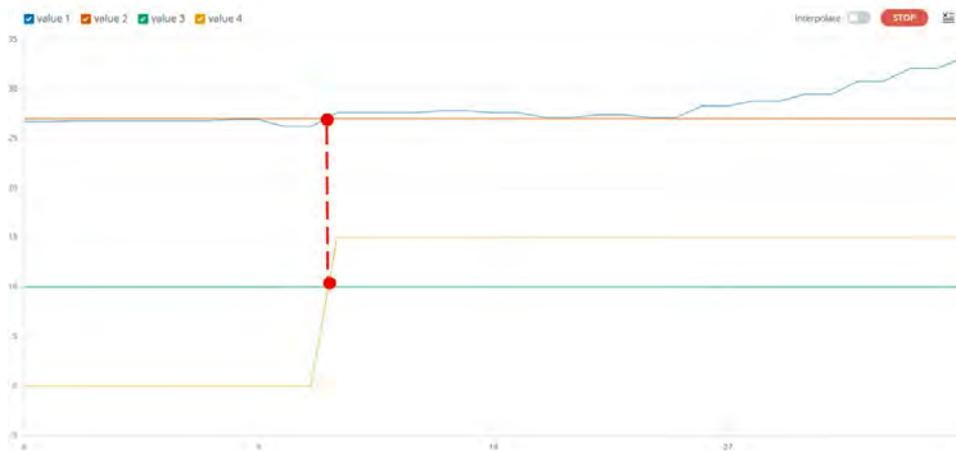


Figura 4.37: Momento de activación

Finalmente, se ejecuta el programa con todos los componentes, asignando valores digitales, ahora sí, de 1 y 0 que representan encendido y apagado (cabe recordar que a los ventiladores se les había asignado valores más altos de encendido para ser su cambio apreciable en la gráfica, pero que la nomenclatura computacional común es 0 y 1).

En la figura 4.38, se muestra la salida de datos de todos los componentes.

- La columna 1 corresponde a las lecturas en tiempo real de la temperatura en °C.
- La columna 2, por su parte, muestra el valor límite de esa T^a
- La columna 3 muestra la cantidad de gases en ppm
- La columna 4, nuevamente, muestra el valor límite de esos ppm.

- La columna 5 muestra el estado del ventilador principal. En todo momento esta activado(10).
- La columna 6, por el contrario, muestra la situación del ventilador auxiliar, y varía en función de si se pasa algún umbral (zona intermedia) o no (zona primera y zona final).
- La columna 7 representa el estado del LED verde, que está encendido cuando el ventilador de 5V está activado.
- La columna 8 hace lo propio pero con el LED rojo, y como se observa varía de la misma forma que la columna 6.
- La columna 9 muestra el estado del buzzer, que se activa por 2 segundos al detectar que se pasan los niveles permitidos, a modo de alarma.

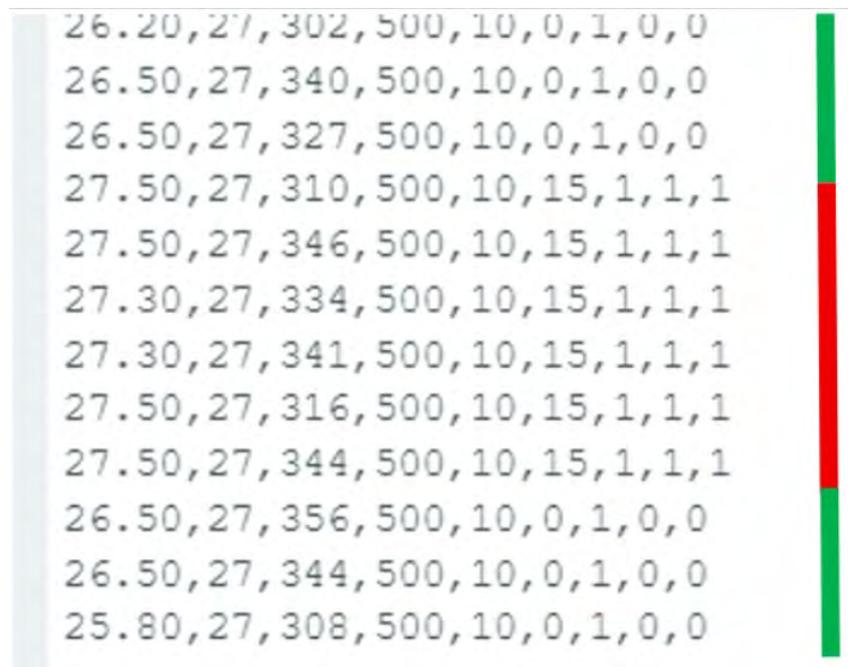


Figura 4.38: Resultado final del sistema

Queda comprobado, por tanto, el correcto funcionamiento del prototipo a partir de los componentes usados, su montaje y el código de Arduino correspondiente.

Ademas de visualizar los valores en el ordenador, la pantalla LCD muestra los valores límite y las lecturas en tiempo real, como se ve en la figura 4.39.

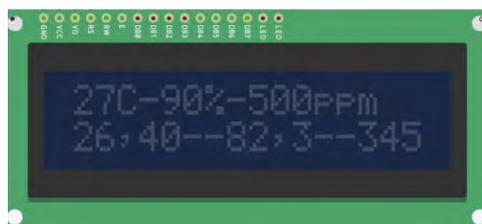


Figura 4.39: Pantalla LCD con resultados



Figura 4.40: Esquema de salida del aire viciado

Visualmente, la circulación del aire del prototipo sería como en las figuras 4.40 y 4.41



Figura 4.41: Esquema de circulación del aire

4.6 MANTENIMIENTO NECESARIO

Para un correcto funcionamiento del prototipo será necesario realizar una serie de cuidados y comprobaciones:

- **Limpieza regular:** limpiar con aire comprimido o brocha suave los sensores, ventiladores y placas para evitar acumulación de polvo. Frecuencia: cada 1–2 semanas.
- **Verificación de conexiones:** revisar que cables, pines y módulos estén bien conectados, sin falsos contactos ni oxidación. Especial atención a los pines del relé, ventiladores y GND común.
- **Revisión de la fuente de alimentación:** comprobar que la fuente de 12V y de 5V funcionen de manera estable, sin sobrecalentamientos ni caídas de voltaje. Usar multímetro si es necesario.
- **Pruebas funcionales periódicas:** simular condiciones de alta temperatura y gases para verificar el funcionamiento del sistema (activación del ventilador de 12V, buzzer, y LEDs correspondientes). Frecuencia: semanal.
- **Calibración y estado de sensores:**
 - DHT11: comprobar que las lecturas sean coherentes, comparar con un higrómetro externo.
 - MQ-2: recalibrar ocasionalmente y probar respuesta ante gases. Si la lectura es constante o errática, reemplazar.
- **Control del pulsador:** verificar que active el ventilador de 5V correctamente al ser presionado. Revisar desgaste o fallos en el mecanismo del botón.
- **Estado de indicadores:** comprobar que el LED rojo se encienda cuando las condiciones críticas están activas y el LED verde en reposo. Cambiar los LEDs si fallan.
- **Buzzer:** probar que suene al activarse la alarma. Reemplazar si no emite sonido aun recibiendo señal HIGH.
- **Registro de mantenimiento:** llevar una bitácora con fecha de revisiones, pruebas realizadas, cambios de componentes y observaciones generales.
- **Disponibilidad de repuestos:** mantener componentes básicos de reemplazo como sensores, relé, ventiladores, LEDs, cables y pulsadores.

5. ESTUDIO DE VIABILIDAD, EFICENCIA ENERGÉTICA Y ECONÓMICA

Una vez realizado el proyecto, se pretende evaluar si el sistema funciona de la forma correcta, las posibles complicaciones que se hayan tenido y ver cual sería el impacto esclamado la interpretación del prototipo a una situación de tamaño real.

5.1 CONSIDERACIONES

El sistema demostró ser funcional con los componentes elegidos y explicados en el apartado 4.3.2 . El montaje presentó algunas complicaciones, teniendo que tomar decisiones como el uso de módulo de relés, elección de las dimensiones del prototipo o cómo cablear el propio sistema. Se considera que el prototipo ha demostrado una viabilidad técnica destacable, pues cumple correctamente con su función principal, que no es otra que activar el sistema de ventilación auxiliar de forma automática en función de un monitoreo continuo.

El código y lógica del programa desarrollado en Arduino IDE es ejecutado con rpaidez y sin errores.

Paralelamente, el sistema es fácil de operar, pues una vez está alimentado de la forma correcta y con el programa sobre el microcontrolador, este trabaja de forma autónoma.

La pantalla LCD y los demás componentes proporcionan una información clara de la situación. Además, el mantenimiento no es complejo, pues como se expone en el apartado 4.6, se basa en revisar las conexiones, los sensores y dispositivos y en atender al funcionamiento de los ventiladores.

Finalmente, el coste total del prototipo está sobre los 75 €, siendo además los componentes electrónicos reutilizables para otros proyectos. Queda así demostrada la baja inversión que es requerida para crear prototipos académicos o informativos que simulen un funcionamiento automático.

5.2 COMPARACIÓN Y ESCALABILIDAD

A fin de comparar y ver la mejora que supone el uso de un sistema automatizado, se procede a analizar como sería la situación del prototipo sin este y cómo lo es con él.

- Estudio del funcionamiento del sistema tradicional :
Si el prototipo fuera tradicional, la ventilación auxiliar debería ser activada de forma manual por uno o varios operarios, suponiendo esto un mayor riesgo dentro de la seguridad y de la eficiencia, pues nunca trabajará de una forma tan precisa como puede hacerlo una máquina. Otra solución sería mantener una ventilación principal más potente, lo cual, como es predecible, supondrá un mayor gasto energético.

Para tratar de simular esta situación, además de mantener la ventilación principal activada en el prototipo, se dejó el ventilador auxiliar conectado de forma permanente. Si bien la ventilación era mucho mas potente de forma continua, esto solo suponía un desperdicio de energía, pues se estaría usando mucho más de la necesaria. Además, suponía un mayor ruido y una menor claridad visual de la respuesta del sistema ante emergencias o situaciones simuladas.

- Estudio del funcionamiento del sistema automatizado:
Este comportamiento demuestra la capacidad del sistema para reaccionar de forma autónoma e inmediata, sin intervención humana, aumentando la seguridad. Además, al desconectarse automáticamente cuando los valores vuelven a la normalidad, se reduce el uso innecesario de energía, lo que refuerza el concepto de eficiencia operativa, y la reducción de contaminación acústica.

Cuadro 5.1: Comparativa entre sistema tradicional y sistema automatizado

Criterio	Sistema tradicional	Sistema automatizado
Activación de ventilación	Manual o constante, sin control por sensores	Automática según valores ambientales detectados por sensores
Tiempo de respuesta	Variable, depende del operario	Inmediato
Eficiencia energética	Menor: el ventilador auxiliar opere continuamente	Alta: el ventilador auxiliar se activa solo cuando es necesario
Riesgo de error humano	Alto, por omisión o demora en la respuesta	Nulo en condiciones simuladas
Información disponible	Escasa o nula	Valores ambientales mostrados en tiempo real en pantalla LCD
Coste de operación	Constante, por uso continuo del ventilador auxiliar	Reducido, por activación puntual y optimizada
Mantenimiento del sistema	Mayor desgaste de componentes por uso constante	Menor desgaste y vida útil prolongada

Cabe resaltar que esta comparativa esta realizada única y exclusivamente referido al prototipo, pues en un caso real haría más alternativas, como se verá en el apartado 5.7

5.3 ESTUDIO DE LA EFICIENCIA

A fin de demostrar la eficiencia que supone el sistema automatizado, se realizan una serie de cálculos como de caudal, de consumo, de tiempo de respuesta... .

Para conectar el prototipo realizado con la realidad, se realizará un proceso de escalabilidad, haciendo una analogía del prototipo con galerías reales.

De esta forma, se estudiarán 4 situaciones diferentes:

- Prototipo automatizado
- Prototipo tradicional supuesto

- Analogía del prototipo escalado automatizado
- Analogía del prototipo escalado tradicional

5.4 PROTOTIPO AUTOMATIZADO

5.4.1 Datos medidos y cálculos

El prototipo utilizado cuenta con 2 ventiladores diferentes como se ve en el apartado 4.3.2, uno de 5V y otro de 12V. Con estos 2 ventiladores se realizarán los cálculos pertinentes.

- **Ventilador auxiliar de 12V:** 12V, 0.27A, 3.24W, 95.6 m³/h
- **Ventilador principal:** 5V, 0.12A, 0.6W, 12 m³/h

Por otro lado, ha de saberse el volumen del prototipo. Al contar con los modelos en CAD de las galerías, ascensor y pozo por el que saldrá el aire viciado (que en el prototipo corresponderá al volumen teórico de aire que debe ser ventilado) se puede saber con exactitud cuál es su valor. Aplicando ciertos comandos y modelos, se obtienen las partes "negativas" del modelo, que corresponderán con su interior, y al aplicar el comando de volumen, se sacan los siguientes datos:

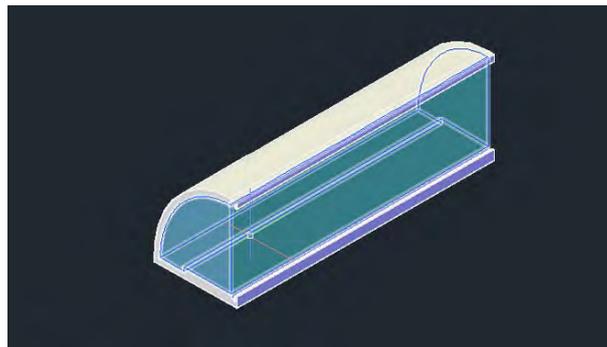


Figura 5.1: Obtención del bloque del interior

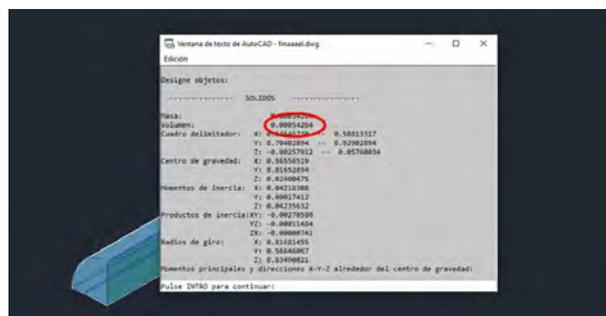


Figura 5.2: Volumen galería 1

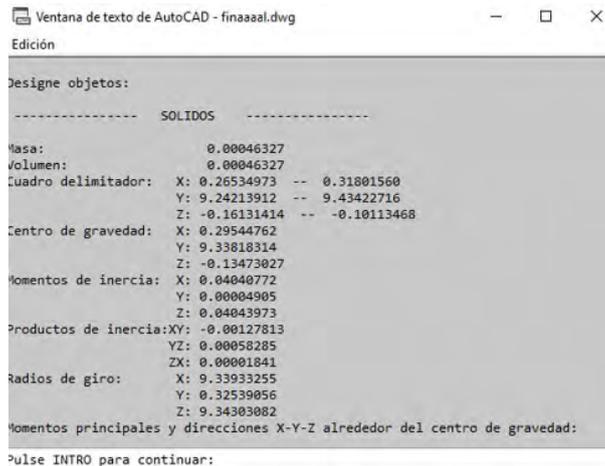


Figura 5.3: Volumen galería 2

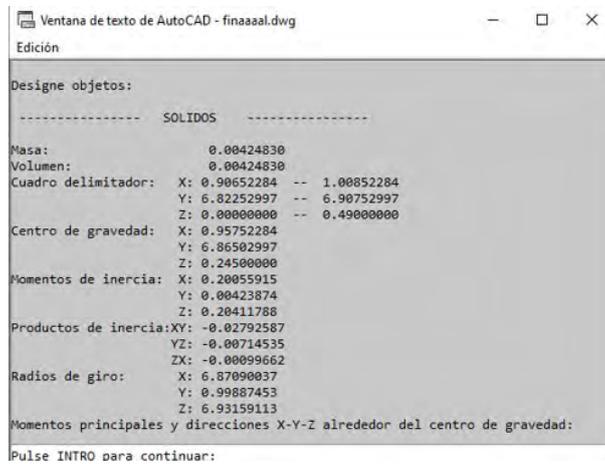


Figura 5.4: Volumen skip

Sumando estos valores, se obtiene el volumen real:

$$V_{\text{total}} = 0,005304060 \text{ m}^3 \approx 5,3 \text{ litros}$$



Figura 5.5: Volumen del pozo de aire viciado

1) Caudal: Valores dados por el fabricante

A cada ventilador le corresponde un caudal, que en este caso viene dado por el fabricante:

Cuadro 5.2: Caudal de los ventiladores empleados en el prototipo. Fuente:4.2.1

Ventilador	Caudal (m ³ /h)
V. auxiliar	95.6
V. principal	12.0

2) Potencia: Cantidad de energía consumida por unidad de tiempo

Se calcula ahora la potencia de cada ventilador, con la energía consumida por hora:

Ventilador auxiliar:

$$P = V \cdot I$$

$$V = 12 \text{ V}, \quad I = 0,27 \text{ A}$$

$$P = 12 \cdot 0,27 = 3,24 \text{ W}$$

Energía consumida en 1 hora:

Electricidad usada en Wh:

$$E = P \cdot t$$

$$P = 3,24 \text{ W}, \quad t = 1 \text{ h}$$

$$E = 3,24 \cdot 1 = 3,24 \text{ Wh}$$

Ventilador principal:

$$V = 5 \text{ V}, \quad I = 0,12 \text{ A}$$

$$P = V \cdot I = 5 \cdot 0,12 = 0,6 \text{ W}$$

Su energía consumida en 1 hora será:

$$t = 1 \text{ h}, \quad P = 0,6 \text{ W}$$

$$E = P \cdot t = 0,6 \text{ Wh}$$

Teniendo estos datos, se hacen los cálculos pertinentes para cuando ambos trabajan en paralelo:

Caudal total y renovaciones por hora

Se calcula el caudal total con los dos ventiladores:

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 = 12 + 95,6 = 107,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

La renovaciones por hora se calculan siguiendo la siguiente fórmula:

$$N = \frac{Q}{V} \tag{5.1}$$

donde:

- Q [m^3/h]: caudal volumétrico de aire
- V [m^3]: volumen del recinto
- N [renovaciones/h]: número de renovaciones de aire por hora

Para el ventilador principal solo:

$$N = \frac{12}{0,005304060} \approx 2262 \text{ renovaciones/h}$$

Tiempo para una renovación: Este tiempo corresponde con el necesario para renovar completamente el volumen de aire del prototipo con el ventilador en funcionamiento.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{0,005304060}{12} \approx 0,000442 \text{ h} \approx 1,59 \text{ seg}$$

Para los dos ventiladores combinados:

$$N = \frac{107,6}{0,005304060} \approx 20281 \text{ renovaciones/h}$$

$$t = \frac{0,005304060}{107,6} \approx 0,0000493 \text{ h} \approx 0,1775 \text{ min}$$

Suponiendo que en un día habitual el sistema auxiliar trabaja 5 horas:

Cuadro 5.3: Tiempos de trabajo y potencias de los ventiladores del prototipo

Ventilador	T. trabajo	Potencia
Principal	24 h/día	0,6 W
Auxiliar	5 h/día	3,24 W

Consumo del sistema:

$$(0,6 \times 24) + (3,24 \times 5) = 30,6 \text{ Wh/día}$$

5.5 PROTOTIPO TRADICIONAL

En caso de que el prototipo no contase con un sistema automatizado hay dos posibilidades: que trabaje con los mismos ventiladores pero que la activación dependa de un operario o que trabaje con un solo ventilador.

Puesto que se están realizando cambios referentes al consumo, la primera posibilidad sufriría cambios muy pequeños, despreciables, por lo que solo se analiza la segunda situación.

Comparativa con ventilador único

Si el prototipo trabaja con un único ventilador, este será más potente que el de 5V, pero seguramente menos que el de 12V.

Se supone un ventilador único de 1,8W. Esto permitirá tener un consumo moderado pero considerable, permitiendo una ventilación constante. Ofrecerá un caudal intermedio que pueda satisfacer la ventilación en condiciones normales.

Si bien es cierto que podría optarse por uno con mayor potencia y que estuviera más cercano a la potencia total que se puede tener en el caso automatizado (3.84), se elige uno algo inferior a modo de que no parezca una decisión sesgada que pueda sobreestimar el ahorro energético del sistema automatizado. Además, esa menor potencia actúa también como un factor de seguridad razonable, garantizando un consumo sin falsear los resultados ni disparar el consumo teórico.

Por otro lado se hace una estimación del caudal que tendría este ventilador. Cabe destacar que los dos ventiladores usados en el sistema automatizado son de diferente voltaje, pero para facilitar los cálculos de algo que no deja de ser teórico se decide hacer una interpolación lineal. Esta se hace porque, a pesar de tener diferentes voltajes, ambos ventiladores son axiales y de

construcción similar, donde el caudal tiende a incrementar de forma proporcional a la potencia en rangos bajos.

Así:

$$Q = Q_1 + \frac{(P - P_1)}{(P_2 - P_1)} \cdot (Q_2 - Q_1)$$

Donde:

- $Q_1 = 12 \text{ m}^3/\text{h}$, $P_1 = 0,6 \text{ W}$
- $Q_2 = 95,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $P_2 = 3,24 \text{ W}$
- $P = 1,8 \text{ W}$

Sustituyendo:

$$Q = 12 + \frac{(1,8 - 0,6)}{(3,24 - 0,6)} \cdot (95,6 - 12) = 12 + \frac{1,2}{2,64} \cdot 83,6 \approx 50,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

Se tiene, por tanto, un único ventilador teórico de 1,8W con un caudal aproximado de 50m³/h

Consumo total

Cuadro 5.4: Tiempo y potencia del ventilador único del prototipo

Ventilador	T. trabajo	Potencia
Principal	24 h/día	1,8 W

$$1,8 \times 24 = 43,2 \text{ Wh/día}$$

Caudal total y renovaciones por hora

$$N = \frac{50}{0,005304060} \approx 9426,74 \text{ renovaciones/h}$$

$$t = \frac{0,005304060}{50} \approx 0,000106 \text{ h} \approx 0,3819 \text{ s}$$

5.6 ANALOGÍA DEL PROTIPO CON EL ESCALADO

Teniendo en cuenta que el modelo está a una escala 1:100, se procede a pasar sus datos a la realidad. Las galerías tendrían entre 19 y 23 metros de largo, con una altura de 6 metros. El

volumen total será el de la escala del prototipo elevado al cubo, por lo que tendrá un total de

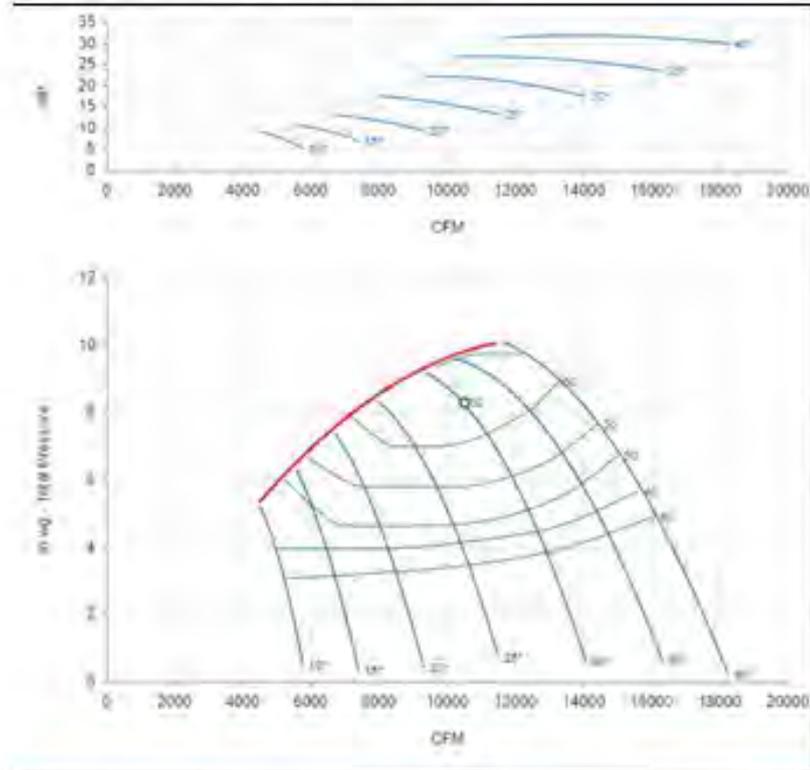
$$0,00530406 \times 1\,000\,000 = 5304,06 \text{ m}^3$$

Por otro lado, se debe hacer una consideración importante: el prototipo usa un ventilador más potente como auxiliar puesto que este generará una gran caudal, siendo mas visual y produciendo unos resultados mayores de forma más rápida, algo muy útil durante la defensa del proyecto, Sin embargo, en una situación real, sería más común tener un ventilador principal más potente y uno o varios menos potentes.

Sabiendo que el volumen sobre el que se tendría que trabajar es de 5304 metros cúbicos, se opta por ventiladores potentes, que permitan varias renovaciones por hora del aire. Se toma como referencia el catálogo de HCA minería [12]. El catálogo cuenta con un gran número de ventiladores y características muy diferentes.

Ventilador 2400-VAX-1800

2800-VAX-1800/ 1 Stage / Full Blade / 2950 RPM



Datos Técnicos 50 Hz	2400-VAX-1800
Tipo de ventilador	Ventilador axial de paletas
Diámetro carcasa	24"
Diámetro hub	18"
Rango de caudal aproximado	5.000 – 14.500 CFM
Rango de presión aproximado	3,0 – 9,0 in.w.g.
Rango de potencias recomendadas	Hasta 25 HP
Velocidad del eje nominal	2950 RPM
Uso de Silenciadores	Opcional
Uso de conexión a manga	Opcional
Tipo de arranque recomendado	Estrella - Triángulo

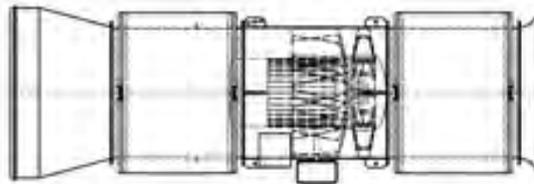
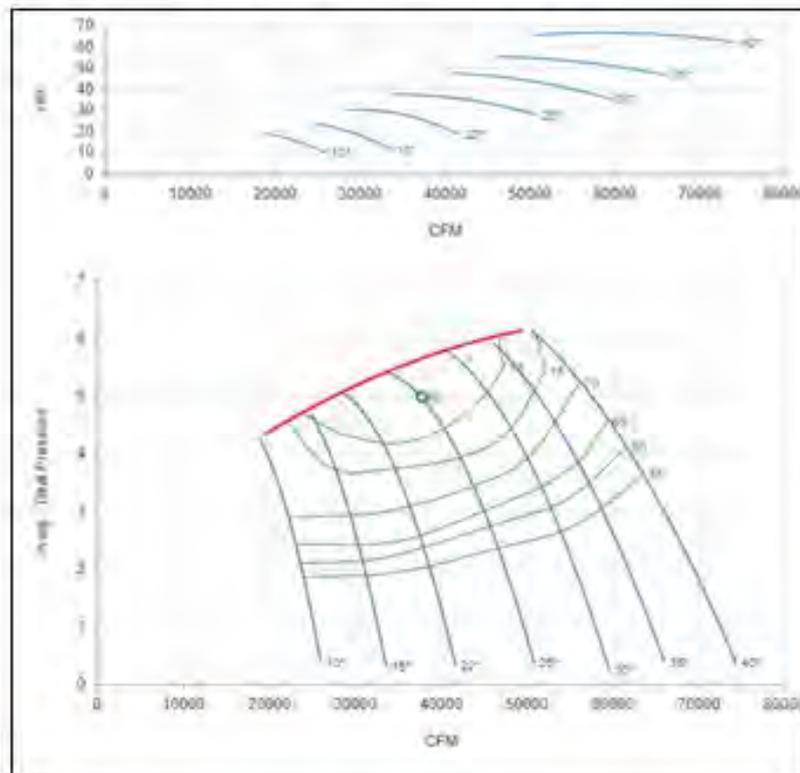


Figura 5.6: Ventilador de 25HP (18.6 kW)

Ventilador 4500 VAX 2700 / Axivane 45-26

SAP: 1557666 * 25Hp

4500-VAX-2700/ 1 Stage / Full Blade / 1460 RPM

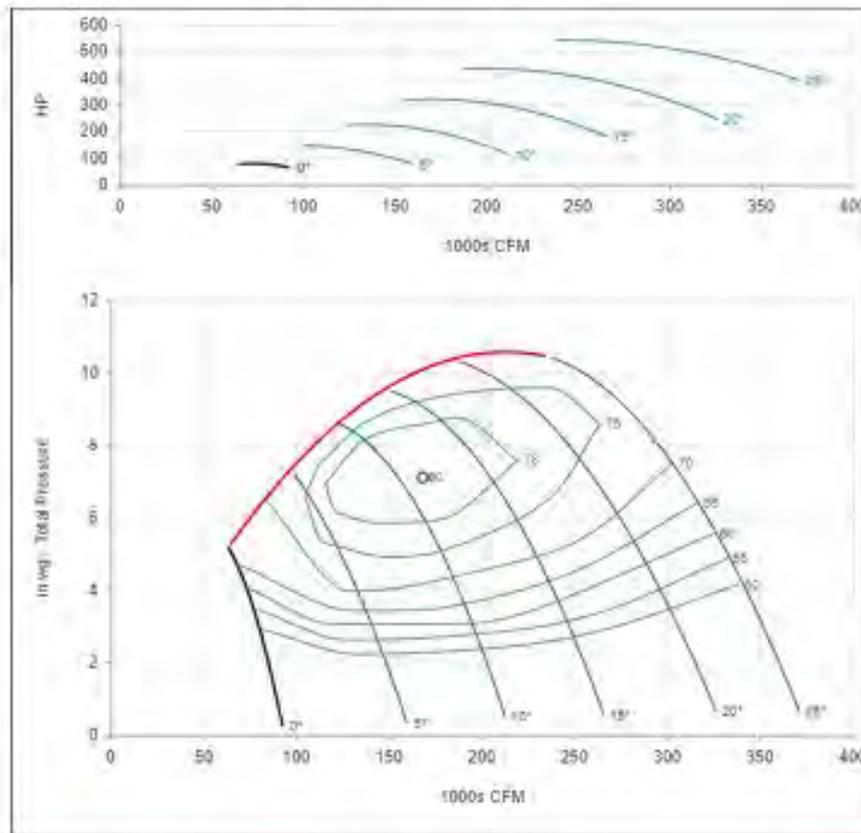


Datos Técnicos 50 Hz	4200-VAX-2100
Tipo de ventilador	Ventilador axial de paletas
Diámetro carcasa	45"
Diámetro hub	26-27"
Rango de caudal aproximado	40.000 – 65.000 CFM
Rango de presión aproximado	2,0 – 6,0 in. w.g.
Rango de potencias recomendadas	25 – 150 HP
Velocidad del eje nominal	1480 RPM
Uso de difusor	Opcional
Uso de silenciadores	Opcional
Uso de conexión a manga	Opcional
Tipo de arranque recomendado	Variador de frecuencia

Figura 5.7: Ventilador de 150HP (111.9kW)

Ventilador 8400-VAX-3150

8400-VAX-3150/ 1 Stage/ Full Blade/ 1180 RPM



Datos Técnicos 50 Hz	8400-VAX-3150
Tipo de ventilador	Ventilador axial de paletas
Diámetro carcasa	84"
Diámetro hub	31,5"
Rango de caudal aproximado	70.000 – 285.000 CFM
Rango de presión aproximado	3,5 – 7,0 in. w.g.
Rango de potencias recomendadas	100 – 400 HP
Velocidad del eje nominal	980 RPM
Uso de difusor	Sí
Uso de conexión a manga	No
Tipo de arranque recomendado	Variador de frecuencia

Figura 5.8: Ventilador de 400HP (293.8kW)

En este caso, se opta por uno de los "pequeños", pues se trata de un caso de una mina reducida. El ventilador principal será 20 kW (el 2800-VAX-1800 , de 22kW, tiene un caudal de 50 metros cúbicos / hora, lo que supondría unas 10 renovaciones por hora. Se toman 20kW para simplificar los cálculos, pues se pretende hacer un estudio y no un diseño riguroso). Para la ventilación auxiliar, se toman ventiladores de 10kW. Un caso real, para este caso, podría ser el de tener 2 ventiladores auxiliares para zonas críticas (como lo son los frentes de trabajo) conectados en paralelo, de tal forma que el caudal pasaría a ser el doble con ellos activados.

Por otro lado, y al igual que en el caso del prototipo, hay principalmente situaciones que pueden sustituir al sistema automatizado. Estas son contar con un ventilador único mas potente o activar y desactivar los auxiliares según conveniencia. Como se ha explicado anteriormente, el segundo caso no cuenta con variaciones significativas en los cálculos puros de consumo energético y ahorro, por lo que se estudia el caso primero, de un ventilador único trabajando de forma continua.

Del mismo modo que antes, se elige un ventilador de mayor potencia, en este caso de 30kW. Con el fin de hacer el análisis del prototipo escalado, en este caso se tendrá en cuenta el precio del sistema automatizado de sensores de alta gama y PLC. Se estima un precio entre los componentes (PLC, pantalla táctil, variador de frecuencia, sensores...), verificaciones y certificaciones, mantenimiento y programación de unos 6000€.

5.7 CÁLCULOS DE LOS MODELOS ESCALADOS

Por lo explicado en el apartado 5.6, se tienen los siguientes ventiladores:

Cuadro 5.5: Comparativa de ventiladores: tiempo, potencia y caudal de aire

Ventilador	T. trabajo	Potencia	Q
Principal	24 h	20 kW	50000 m ³ /h
Auxiliar (zonas)	5 h	10 kW	25000 m ³ /h
Único	24 h	30 kW	80000 m ³ /h

Consumo dual:

El consumo en el caso del sistema automatizado, que cuenta con dos ventiladores, será de

$$(20 \times 24) + (10 \times 5) \times 2 = 580 \text{ kWh/día}$$

Consumo único:

El consumo de un sistema tradicional con un único ventilador, será de

$$24 \times 30 = 720 \text{ kWh/día}$$

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Sabiendo ya los consumos teóricos de los 4 casos expuestos:

- Prototipo automatizado
- Prototipo tradicional supuesto
- Analogía del prototipo escalado automatizado
- Analogía del prototipo escalado tradicional

se procede a calcular el ahorro que se produce:

6.1 AHORRO ENTRE EL PROTOTIPO TRADICIONAL Y EL AUTOMATIZADO:

$$\frac{43,2 - 30,6}{30,6} \times 100 = 41 \%$$

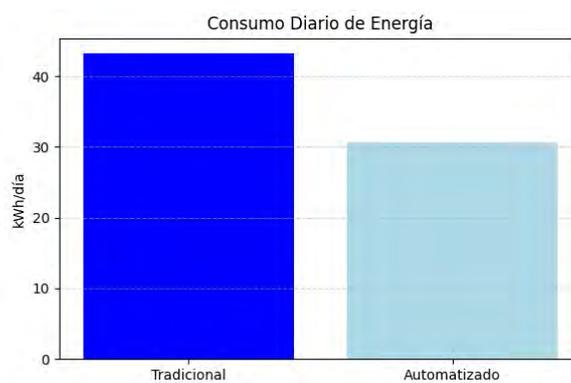


Figura 6.1: Diferencias del consumo del prototipo

6.2 AHORRO ENTRE EL MODELO ESCALADO TRADICIONAL Y EL AUTOMATIZADO:

$$\frac{720 - 580}{580} \times 100 = 24,1 \%$$

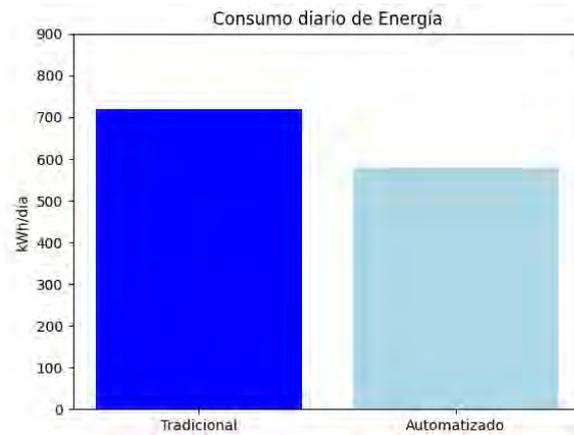


Figura 6.2: Diferencias de consumo escalado

Se puede observar que en el caso del prototipo, el ahorro es muy significativo, y eso se debe a que, como se explica en 5.6, el ventilador auxiliar es el más potente, haciendo que el ventilador único que usa el sistema tradicional sea muy superior al principal que usa el sistema automatizado.

Esto, sin embargo, no quita que demuestre la eficacia del proceso de automatización, pues los ventiladores usados en el modelo escalado son mucho más coherentes con la realidad y se puede observar un ahorro de más del 24%, un valor muy a tener en cuenta.

Estos datos ya son significativos, pero se realizan más cálculos para ver el beneficio real de la automatización:

6.3 AHORRO ECONÓMICO

Ese ahorro puede traducirse a términos económicos. Al contar con los datos de kWh de cada modelo, sabiendo el precio por kWh en España, se pueden transformar a €.

Para ello se obtuvieron, a día 19 de Junio de 2025, los datos del precio del kWh de los últimos 12 meses del país:

Precio medio electricidad en España (último año)

Mes	Precio medio (€/MWh)
Julio 2024	132,58
Agosto 2024	146,38
Septiembre 2024	134,08
Octubre 2024	135,21
Noviembre 2024	157,92
Diciembre 2024	175,18
Enero 2025	159,85
Febrero 2025	158,06
Marzo 2025	123,31
Abril 2025	108,47
Mayo 2025	112,98
Junio 2025	126,72
Media	140,96

Cuadro 6.1: Precio medio mensual de la electricidad en España (€/MWh) [20]

Tomando un precio medio de 140,957 €/MWh:

$$140,957 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 0,140957 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

se puede realizar el cálculo:

Precio = kWh × €/kWh

En el caso del prototipo, los valores serán muy pequeños por operar con potencias y valores bajos:

- Sistema automatizado dual: $0,0866 \times 0,140957 = 0,01221 \approx 0,00431$ /día
- Sistema único tradicional: $0,0432 \times 0,140957 = 0,00609 \approx 0,00509$ /día

$$0,00609 - 0,00431 = 0,00178 \text{ /día más barato}$$

Sin embargo, en el caso del modelo escalado es muy significativo:

- Sistema automatizado dual: $580 \times 0,140957 = 81,75$ /día
- Sistema único tradicional: $720 \times 0,140957 = 101,48$ /día

Ahorro:

$$101,48 - 81,75 = 19,73 \text{ /día} \Rightarrow 19,73 \times 365 = 7201 \text{ /año}$$

Si se resta un aproximado de 6000 que cuesta un sistem PLC avanzado remoto (como se



Figura 6.3: Comparación gasto diario en €

justifica en el capítulo 5.6), se puede observar que en tan solo un año ya estaría amortizado el sistema (y, además, puede utilizarse en algunos casos posteriores de otras minas con ciertos cambios técnicos y de programación). En la figura 6.4, se puede ver el gasto ampliado a 5 años de un sistema frente a otro.



Figura 6.4: Comparación gasto en 5 años en €

6.4 EMISIONES DE CO₂ EVITADAS

La reducción en el consumo eléctrico también implica una disminución en las emisiones indirectas de CO₂. Esto se calcula mediante la siguiente estimación:

$$\text{Emisiones evitadas (kg CO}_2\text{)} = \Delta\text{Consumo (kWh)} \times \text{Factor de emisión (kg CO}_2\text{/kWh)}$$

En el caso del modelo escalado, entre un caso y otro, se ahorraría:

$$140 \text{ kWh/día} \times 0,2 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 28 \text{ kg CO}_2/\text{día}$$

$$28 \text{ kg CO}_2/\text{día} \times 365\text{días} = 10220 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

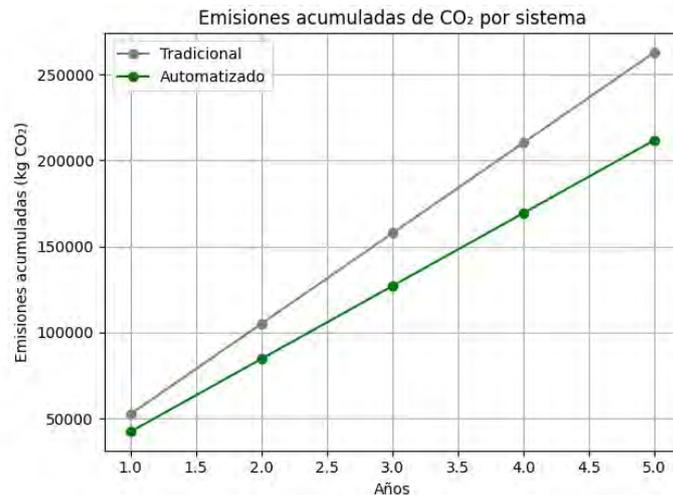


Figura 6.5: Comparación de las emisiones anuales

Comparación con la activación manual:

A priori, queda demostrada la eficacia en términos económicos entre un sistema y otro. Sin embargo, puede que surja la duda de por qué no tener el sistema con un ventilador fijo y otros auxiliares y que estos se activen de forma manual.

Si bien es cierto que en términos de consumo, siempre que haya un monitoreo continuo y adecuado no hay una gran diferencia, si que son varios los aspectos negativos de este sistema:

- Puede quedar activado un ventilador de más (error humano)
- Requiere la presencia de un operario en la sala de control
- Requiere una reacción rápida
- En caso de fallo, hay riesgos de salud o tragedias
- Además, en ese mismo caso, hay tiempo trabajo perdido

Análisis de fallos y costes asociados

Por tanto, a modo de resumen de los cálculos anteriores, se obtiene la tabla 6.2:

Parece, mediante cálculos rápidos y coherentes, que el tradicional con un sólo ventilador no es rentable frente al resto. Sin embargo, es normal creer que, entre un sistema con ventiladores principales y auxiliares que funcione de forma autónoma y uno con un operario o varios operarios activándolos y desactivándolos de forma manual, sea mejor elegir este último por no tener

Cuadro 6.2: Comparación entre sistemas de ventilación: consumo, gasto y emisiones

Sistema	Consumo Energía	Gasto Económico	Emisiones CO ₂
Prototipos			
Prototipo Automatizado	30,6 Wh/día	1,57 €/año	Despreciables
Prototipo Tradicional	43,2 Wh/día	2,22 €/año	Despreciables
Sistemas Escalados			
Escalado Automatizado	580 kWh/día	81,76 €/día	42 t/año
Escalado Tradicional	720 kWh/día	101,48 €/día	52,56 t/año
Escalado Tradicional Manual	580 kWh/día	81,76 €/día	42 t/año

que gastar en un sistema PLC, y ahorrar así los 6000€ aproximados.

Sin embargo, este sistema puede tener costes asociados al error humano. Los errores humanos no son expresamente cuantificables, pues depende de muchos factores. Sin embargo, puede realizarse un ejercicio de imaginación con diferentes situaciones, de las más optimistas a las más pesimistas, llegando a las siguientes estimaciones en términos de fallos y costes:

- Es razonable esperar 1 fallo cada 2 semanas por frente (en este caso 2, unos 40-50 al año)
- Parada: 25 € por trabajador (1h ≈ 25 €)
- Coste de energía: 0.5-2€ por actividad innecesaria
- Multa por superar ciertos valores (máximo: 10.000 €, 30€ de media)

Se supone un total de 9 trabajadores.

Por tanto, cada hora parada supone una pérdida de 225€.

Para ganar rigor, se exponen diferentes casos, estimando una pérdida de 0.5h por cada fallo (pueden ser varias si fuera muy importante, o nada si fuera pequeño).

Escenario	Fallos	Coste (€)
Optimista	0	0
Realista moderado	15	1687
Realista	40	4500
Pesimista	80	9000

Mediante este análisis hipotético, se pretende demostrar que los fallos humanos también tienen costes asociados. Pese a ello, estos cálculos no tienen el rigor suficiente como para elegir entre un sistema u otro.

Sin embargo, si que hay un punto muy importante y trascendental; la cuestión de seguridad y salud de los trabajadores.

6.5 SEGURIDAD Y SALUD COMO FACTOR DETERMINANTE

Como se explica anteriormente, pese a que se pueda tratar de cuantificar el valor económico de los fallos humanos, estos son realmente muy variables, pudiendo un fallo producir una parada de 5 minutos hasta volver a tener una correcta ventilación hasta una multa grave por exceder

límites con personal trabajando.

Sin embargo, y como se ha explicado antes, el problema de este sistema no está tanto en la eficiencia económica y de emisión de gases, sino en la mejor que supone para la seguridad y la salud.

Para estudiar la eficacia del sistema, se procede a realizar simulaciones numéricas computacionales del sistema manual y del sistema automatizado, a fin de comparar los resultados.

Para ello, se escriben los siguientes códigos en python, donde se harán 10 iteraciones de 10.000.000 de situaciones para cada uno:

En el primero de ellos se definen las siguiente probabilidades:

Cuadro 6.3: Probabilidades asociadas a riesgos en el sistema

Evento	Probabilidad
Fallo humano	0,0085
Presencia de gases peligrosos	0,20
Fallo del motor	0,15
Efectos leves para la salud	0,05
Enfermedades crónicas	0,02
Intoxicación rápida	0,015
Explosión	0,02
Explosión con resultado fatal	0,10

En un 0.85 % de los casos habrá un fallo humano a la hora de activar los ventiladores. De esos casos, en un 20 % habrá un aumento considerable de gases tóxicos o inflamables. Por otro lado, la probabilidad de que halla un motor encendido o en labores de arranque será del 15 %. Con todos los supuesto que puede haber (y de gran dificultad, para no falsear los resultados o que estos queden sobreestimados, en un 5 % de los casos donde hay una fuga de gases peligrosos se contraerá una enfermedad leve, en un 2 % un crónica y en un 1.5 % se producirá una intoxicación. De la misma forma, se asignan ciertos porcentajes para las explosiones. Se obtiene así el siguiente código, que simulará 100.000.000 de situaciones del sistema escalado con activación manual:

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # Parametros
6 n = 10_000_000 \ %Numero de simulaciones
7 iteraciones = 10
8 np.random.seed(42)
9
10 # Probabilidades
11 p_fallo_humano = 0.0085
12 p_gas_riesgo = 0.20
13 p_motor = 0.15
14 p_leves = 0.05
15 p_cronicas = 0.02
16 p_intoxicacion_rapida = 0.015
17 p_explosion = 0.02
18 p_explosion_fatal = 0.10
19
20 # Resultados
21 resultados = []

```

```
22
23 for i in range(iteraciones):
24     fallo_humano = np.random.rand(n) < p_fallo_humano
25     gas_riesgo = np.random.rand(n) < p_gas_riesgo
26     motor_encendido = np.random.rand(n) < p_motor
27     evento_riesgo = fallo_humano & gas_riesgo
28     probabilidades = np.random.rand(n)
29
30     enf_leve = evento_riesgo & (probabilidades < p_leves)
31     enf_cronica = evento_riesgo & (probabilidades < p_leves +
32         p_cronicas) & ~enf_leve
33     intox_rapida = evento_riesgo & (probabilidades < p_leves +
34         p_cronicas + p_intoxicacion_rapida) & ~(enf_leve | enf_cronica)
35     explosivo = evento_riesgo & motor_encendido & (probabilidades <
36         p_leves + p_cronicas + p_intoxicacion_rapida + p_explosion)
37     explosion_fatal = explosivo & (np.random.rand(n) <
38         p_explosion_fatal)
39
40     resultados.append({
41         "iteraci n": i + 1,
42         "enf_leve": enf_leve.sum(),
43         "enf_cronica": enf_cronica.sum(),
44         "intox_rapida": intox_rapida.sum(),
45         "explosivo": explosivo.sum(),
46         "explosion_fatal": explosion_fatal.sum()
47     })
48
49 df_resultados = pd.DataFrame(resultados)
50 print(df_resultados)
51
52 # Gr fico de barras apiladas
53 etiquetas = df_resultados["iteraci n"]
54 leves = df_resultados["enf_leve"]
55 cronicas = df_resultados["enf_cronica"]
56 intox = df_resultados["intox_rapida"]
57 explosiones = df_resultados["explosivo"] -
58     df_resultados["explosion_fatal"]
59 fatales = df_resultados["explosion_fatal"]
60
61 plt.figure(figsize=(12, 7))
62 plt.bar(etiquetas, leves, label="Leves")
63 plt.bar(etiquetas, cronicas, bottom=leves, label="Cr nicas")
64 plt.bar(etiquetas, intox, bottom=leves+cronicas, label="Intoxicaci n
65     R pida")
66 plt.bar(etiquetas, explosiones, bottom=leves+cronicas+intox,
67     label="Explosiones (No fatales)")
68 plt.bar(etiquetas, fatales, bottom=leves+cronicas+intox+explosiones,
69     label="Explosiones Fatales")
70
71 plt.xlabel("Iteraci n")
72 plt.ylabel("N mero de Casos")
73 plt.title("Casos por Tipo - Barras Apiladas por Iteraci n")
74 plt.legend()
75 plt.xticks(etiquetas)
76 plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.6)
77 plt.tight_layout()
78 plt.show()
```

Listing 6.1: Simulación y gráfico de eventos de riesgo

Al ejecutar el programa se obtiene la figura 6.6, donde se puede ver el numero de situaciones de riesgo que ha habido.

iteración	enf_leve	enf_cronica	intox_rapida	explosivo	explosion_fatal	
0	1	849	354	243	258	25
1	2	857	350	263	248	19
2	3	826	350	274	242	23
3	4	861	347	255	286	26
4	5	833	342	258	271	27
5	6	869	378	258	257	31
6	7	867	368	251	274	25
7	8	887	351	240	249	15
8	9	869	312	248	276	30
9	10	859	347	262	278	35

Figura 6.6: Resultados de las 10 simulaciones del sistema manual

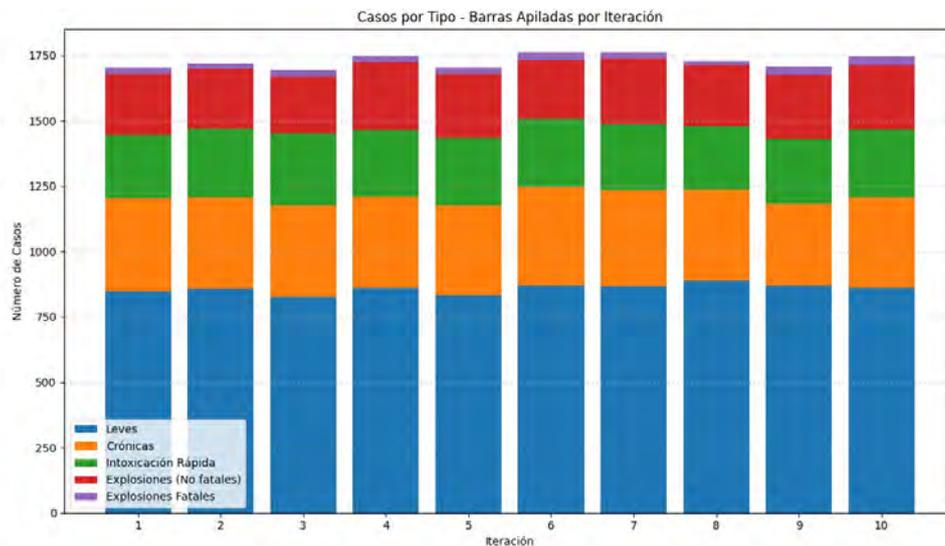


Figura 6.7: Gráfico de resultados de las 10 simulaciones del sistema manual

Código y resultados para el sistema automatizado

El código para el sistema automatizado, tendrá las mismas probabilidades, pero con el añadido de que en el 99.9% de las veces el sistema PLC funcionará correctamente, y en caso de fallar habrá un humano que supervise su funcionamiento (este, nuevamente, tiene una probabilidad asignada de fallara del 0,85%), será:

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import seaborn as sns
5
6 # Parametros generales
7 n = 10_000_000
8 num_iteraciones = 10
    
```

```
9 np.random.seed(42)
10
11 # Probabilidades del sistema automatizado con respaldo humano
12 p_fallo_automata = 0.001
13 p_fallo_humano_si_falla_auto = 0.01
14 p_gas_riesgo = 0.20
15 p_motor = 0.15
16 p_leves = 0.05
17 p_cronicas = 0.02
18 p_intoxicacion_rapida = 0.015
19 p_expllosion = 0.02
20 p_expllosion_fatal = 0.10
21
22 # Simulacion
23 resultados = []
24
25 for i in range(num_iteraciones):
26     np.random.seed(i)
27
28     fallo_automata = np.random.rand(n) < p_fallo_automata
29     fallo_humano = np.random.rand(n) < p_fallo_humano_si_falla_auto
30     fallo_total = fallo_automata & fallo_humano
31
32     gas_riesgo = np.random.rand(n) < p_gas_riesgo
33     motor_encendido = np.random.rand(n) < p_motor
34
35     evento_riesgo = fallo_total & gas_riesgo
36     probabilidades = np.random.rand(n)
37
38     enf_leve = evento_riesgo & (probabilidades < p_leves)
39     enf_cronica = evento_riesgo & (probabilidades < p_leves +
40         p_cronicas) & ~enf_leve
41     intox_rapida = evento_riesgo & (probabilidades < p_leves +
42         p_cronicas + p_intoxicacion_rapida) & ~(enf_leve | enf_cronica)
43     explosivo = evento_riesgo & motor_encendido & (probabilidades <
44         p_leves + p_cronicas + p_intoxicacion_rapida + p_expllosion)
45     explosion_fatal = explosivo & (np.random.rand(n) <
46         p_expllosion_fatal)
47
48     resultados.append({
49         'Iteraci n': i + 1,
50         'Enf leve': enf_leve.sum(),
51         'Enf cr nica': enf_cronica.sum(),
52         'Intox r pida': intox_rapida.sum(),
53         'Explosiones': explosivo.sum(),
54         'Expl fatales': explosion_fatal.sum()
55     })
56
57 df_resultados = pd.DataFrame(resultados)
58 print(df_resultados)
59
60 #Grafico de barras apiladas
61 etiquetas = df_resultados["Iteraci n"]
62 leves = df_resultados["Enf leve"]
63 cronicas = df_resultados["Enf cr nica"]
64 intox = df_resultados["Intox r pida"]
65 explosiones = df_resultados["Explosiones"] - df_resultados["Expl
66     fatales"]
```

```

62 fatales = df_resultados["Expl fatales"]
63
64 plt.figure(figsize=(12, 7))
65 plt.bar(etiquetas, leves, label="Leves")
66 plt.bar(etiquetas, cronicas, bottom=leves, label="Crónicas")
67 plt.bar(etiquetas, intox, bottom=leves+cronicas, label="Intoxicación
68 Rápida")
68 plt.bar(etiquetas, explosiones, bottom=leves+cronicas+intox,
69 label="Explosiones (No fatales)")
69 plt.bar(etiquetas, fatales, bottom=leves+cronicas+intox+explosiones,
70 label="Explosiones Fatales")
71
71 plt.xlabel("Iteración")
72 plt.ylabel("Número de casos")
73 plt.title("Eventos por iteración (Sistema automatizado + respaldo
74 humano)")
74 plt.xticks(etiquetas)
75 plt.legend()
76 plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.6)
77 plt.tight_layout()
78 plt.show()

```

Listing 6.2: Simulación y gráfico de eventos con sistema automatizado y respaldo humano

Iteración	Enf leve	Enf crónica	Intox rápida	Explosiones	Expl fatales
0	1	1	1	0	0
1	2	1	0	0	0
2	3	1	1	0	0
3	4	0	1	0	0
4	5	0	1	0	0
5	6	1	0	1	0
6	7	2	0	2	0
7	8	2	1	0	1
8	9	0	0	0	0
9	10	1	0	0	0

Figura 6.8: Resultados de las 10 simulaciones del sistema automatizado

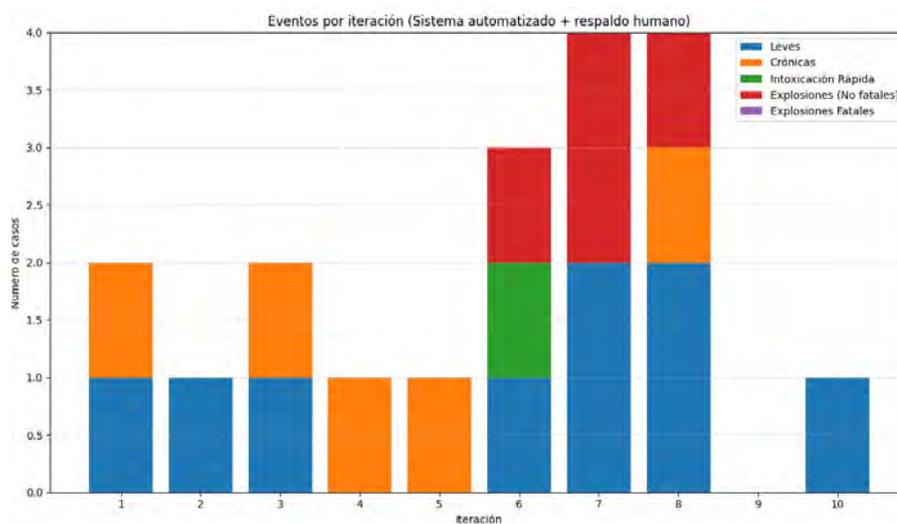


Figura 6.9: Gráfico de resultados de las 10 simulaciones del sistema automatizado

Al comparar los dos resultados, hay una diferencia notoria. Tras simular 10.000.000 de situaciones 10 veces, en el sistema automatizado, con el simple hecho de incorporar un sistema automatizado con monitoreo continuo y hacer que la persona pase a solo supervisar su correcto funcionamiento, hubo un total de 1 accidente fatal (por intoxicación rápida), y tan solo 4 explosiones, 9 enfermedades leves y 5 crónicas, por las 268 situaciones fatales (donde en cada una puede haber más de 1 muerte, sobre todo con las explosiones fatales, que son hasta 25) con más de 1000 enfermedades totales en el sistema manual.

Si bien estos últimos datos, teniendo en cuenta que se representaron 100.000.000 de situaciones no son muy altos, no son ni comparables a los obtenidos con el sistema automatizado, quedando este respaldado por esta rápida simulación numérica con los parámetros explicados al principio del presente capítulo.

6.6 ANÁLISIS FINAL DE LOS RESULTADOS

Tras tener también en cuenta el factor fundamental que suponen la seguridad y salud de los trabajadores, se expone una nueva tabla de los sistemas escalados a modo de resumen.

Cuadro 6.4: Comparación de sistemas escalados: consumo, gasto, emisiones y seguridad

Sistema	Consumo	Gasto	Emisiones CO ₂	Seguridad
Automatizado	580 kWh/día	81,76 €/día	42 t/año	Muy alta (accidentes muy poco probables)
Tradicional	720 kWh/día	101,48 €/día	52,56 t/año	Alta (accidentes poco probables)
Tradicional Manual	580 kWh/día	81,76 €/día	42 t/año	Alta (accidentes poco probables)

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 CONCLUSIONES

Con un enfoque escalado y comparativo, los resultados obtenidos permiten concluir que la implementación de un sistema automatizado supone una mejora en diversos aspectos.

En primer lugar, los cálculos realizados exponen reducciones en el consumo energético de más del 20 % en el modelo escalado, lo que se traduce en un ahorro de hasta 7000€ anuales.

Además, el uso de la automatización permite evitar emisiones de CO₂ innecesarias, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental del proyecto minero en cuestión.

Desde un punto de vista de operativo, el sistema reacciona de forma inmediata a las lecturas de los sensores, eliminando el riesgo de que se produzca un error humano y minimizando siempre el desgaste de los componentes presentes, como los propios equipos, aumentando su vida útil.

Por otro lado, las simulaciones de escenarios de fallo, pese a realizarse con probabilidades bajas evidencian una reducción al casi 0 en accidentes y enfermedades laborales con solo implementar un sistema automatizado que funcione como medida de seguridad. Esto hace de ello una mejora no sólo técnica, sino de seguridad y salud personal.

En conjunto, la automatización lleva tiempo emergiendo como una solución rentable, viable y necesaria para afrontar los retos actuales como la sostenibilidad, eficiencia y seguridad operativa, y continúa desarrollándose como un pilar fundamental dentro de la modernización tecnológica del sector minero.

7.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los resultados obtenidos se proponen diversas líneas futuras de investigación:

- Estudio del comportamiento del modelo en un entorno operativo real:

Validar el sistema en un entorno real de funcionamiento, como una mina en operación, sería esencial para consolidar los resultados del presente proyecto.

Esto permitiría comprobar la viabilidad práctica del modelo más allá de simulaciones y pruebas controladas realizadas hasta ahora.

Se podría analizar, en concreto, la respuesta del sistema frente a cambios bruscos en las condiciones del aire, evaluar su capacidad de adaptación y la estabilidad de los sensores en presencia de variables más extremas a las consideradas en el entorno simulado.

- Desarrollo de un prototipo accesible para la implementación de sensores a lo largo de la explotación o en los propios operarios de manera portátil:

Como ampliación tecnológica del sistema, se propone el diseño de un prototipo de bajo coste y fácil replicación que permita la incorporación de sensores distribuidos a lo largo de la explotación minera.

Alternativamente, estos sensores podrían integrarse en dispositivos portátiles que acompañen a los propios operarios, con el fin de monitorizar en tiempo real las condiciones del entorno de forma personalizada.



Figura 7.1: Posibilidad de incorporar un monitoreo personalizado

Estas lecturas de datos podría ser enviadas a una plataforma común central o a un sistema inteligente donde se analice la información y se gestionen de forma dinámica los diferentes puntos de ventilación.

Además, la incorporación de técnicas en desarrollo como el machine learning o la inteligencia artificial permitirían mejorar la capacidad del sistema a la hora de anticiparse a necesidades de ventilación, de optimizar el uso energético o de actuar de forma autónoma ante cambios ambientales, elevando así la eficiencia y seguridad operativa de la mina real.

Bibliografía

- [1] Codelco - División Andina. *Implementación de Sistema de Ventilación Secundaria Automática en Minería Subterránea*. Inf. téc. Estimaciones de ahorro energético entre 20 y 30 % en ventilación secundaria. Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), 2020. URL: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20201001/pags/20201001161834.html.
- [2] Emiliano Almansa Rodríguez y Ángel Hernández Sobrino. “La ingeniería militar al servicio de las minas de azogue de Almadén”. En: *Revista de Historia Moderna* (2024). Documenta la observación de Jorge Juan sobre la mala ventilación y las atmósferas viciadas en Almadén.
- [3] Łukasz Bołoz y Witold Biały. “Automation and Robotization of Underground Mining in Poland”. En: *Applied Sciences* 10.20 (2020), pág. 7221. DOI: 10.3390/app10207221.
- [4] Andy Brunning. *The Chemical Elements of a Smartphone*. Consultado el 27 de Marzo de 2025. 2014. URL: <https://www.compoundchem.com/2014/02/19/the-chemical-elements-of-a-smartphone/>.
- [5] Felipe Calizaya. “Instalación de ventiladores y controles de ventilación en minas metálicas”. En: *Revista de Medio Ambiente y Minería* 7.1 (2022). Artículo recibido: 12.12.2021; aceptado: 13.02.2022, n.p. URL: https://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522022000100006.
- [6] CDT. *Revolucionaria tecnología para medir polvo suspendido*. Portal CDT. “El polvo suspendido es uno de los mayores desafíos en faenas mineras...”. 2024. URL: <https://www.cdt.cl/revolucionaria-tecnologia-para-medir-polvo-suspendido-aliada-en-mineria-y-construccion/>.
- [7] Yang Chen et al. “Research on Intelligent Ventilation System of Metal Mine Based on Real-Time Sensing Airflow Parameters with a Global Scheme”. En: *Mining* 5.1 (2024), pág. 13. DOI: 10.3390/mining05010013.
- [8] European Commission. *Proposal for a Regulation establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2023:0160:FIN>. Critical Raw Materials Act. Mar. de 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2023:0160:FIN>.
- [9] European Commission. *Proposal for a Regulation establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2023:160:FIN>. Critical Raw Materials Act (CRMA). Mar. de 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2023:160:FIN>.

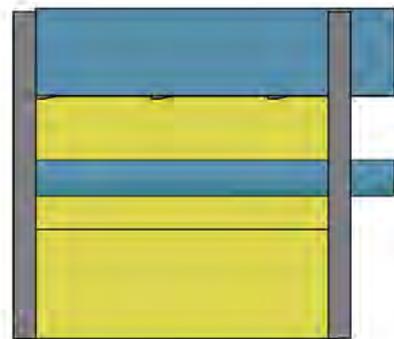
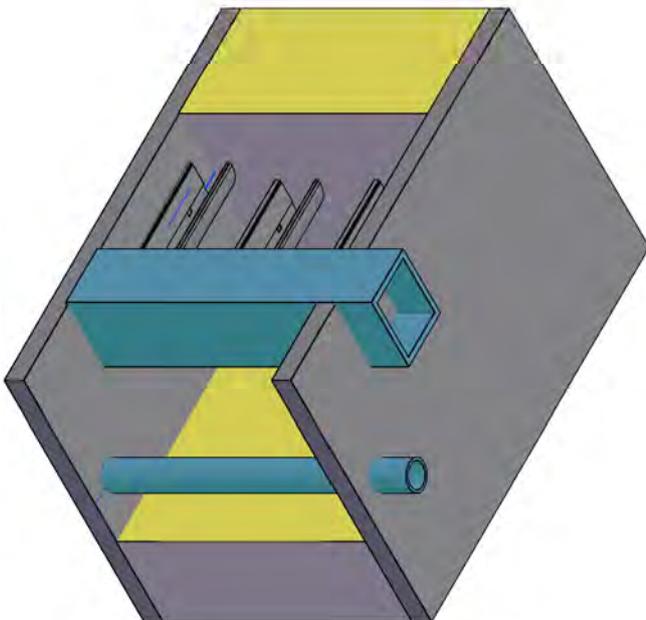
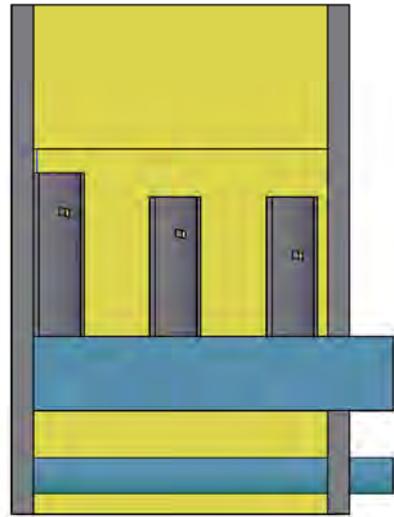
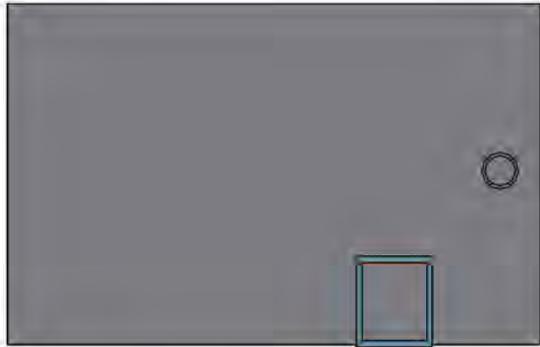
- [10] Sina Hazrathosseini y Mahyar Afrapoli. “Maximizing Mining Operations: Unlocking the Crucial Role of Intelligent Fleet Management Systems”. En: *Mining* 4.1 (2024), págs. 7-20. DOI: 10.3390/mining4010002.
- [11] Juan Herrera Herbert. *Introducción a la ventilación minera*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2019. URL: <https://www.minas.upm.es>.
- [12] Howden Chile Andes (HCA Minería). *Catálogo de Ventiladores Auxiliares Howden*. Disponible en PDF proporcionado por HCA Minería. Howden. 2024. URL: <http://www.hcamineria.cl>.
- [13] Juan Arruzas Insua. *Códigos utilizados en el TFG para Arduino*. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.15807822. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15807822> (visitado 04-07-2025).
- [14] Michael Long et al. “Equipment and Operations Automation in Mining: A Review”. En: *Machines* 12.10 (2024), pág. 713. DOI: 10.3390/machines12100713.
- [15] M. J. McPherson. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Springer, 1993. DOI: 10.1007/978-1-4471-1999-1.
- [16] HCA Minería. *Automatización de la ventilación en minería: Una tecnología eficiente*. Sitio web HCA Minería. Imagen utilizada y consultada para ilustrar sistemas de ventilación automatizados. Nov. de 2022. URL: <https://hcamineria.cl/automatizacion-de-la-ventilacion-en-mineria-una-tecnologia-eficiente/>.
- [17] Eldiario Montañés. “Una empresa australiana encuentra zinc y la mina de Udías reabrirá”. En: *Eldiario Montañés* (5 de mar. de 2025). Consultado el 12 de abril de 2025. URL: <https://www.eldiariomontanes.es/region/occidental/empresa-australiana-encuentra-zinc-mina-udias-reabrira-20250305071700-nt.html>.
- [18] Otros Mundos Chiapas A.C. *Ilustración sobre minería y medio ambiente*. Accedido el 14 de mayo de 2025. s.f. URL: <https://otrosmundoschiapas.org>.
- [19] Alicia Avilés Pozo. *Tierras raras vs tierras vivas: así triunfó el ‘no a la mina’ en Ciudad Real*. Accedido el 19 de marzo de 2025. 2017. URL: https://www.eldiario.es/castilla-la-mancha/tierras-tierras-triunfo-ciudad-real_1_3000358.html.
- [20] Preciodelaluz.com. *Precio de la luz por meses - Histórico*. Consultado el 2 de junio 2025. 2025. URL: <https://preciodelaluz.com/precio-por-meses-total>.
- [21] S.n. *Figura 13. Movimiento de una vagoneta en la mina Éxito en junio de 1909. Fotografía de H. Schwabe*. Consultado el 10 de abril de 2025. 1909. URL: https://www.researchgate.net/figure/Figura-13-Movimiento-de-una-vagoneta-en-la-mina-Exito-en-junio-de-1909-Fotografia-de_fig5_350048978.
- [22] H. A. Saleem. “Energy Consumption Reduction in Underground Mine Ventilation System: An Integrated Approach Using Mathematical and Machine Learning Models Toward Sustainable Mining”. En: *Sustainability* 17.3 (2025), pág. 1038. DOI: 10.3390/su17031038. URL: <https://doi.org/10.3390/su17031038>.
- [23] Soler & Palau. *Hojas técnicas de acoplamiento de ventiladores*. Consultado el 25 de junio de 2025. 2025. URL: <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-acoplamiento-de-ventiladores/>.

- [24] E. De Souza. *Improving the Energy Efficiency of Mine Fan Assemblages*. Technical Report. Ventilation systems may account from 25–40% of the total energy costs and 40–50% of the energy consumption of a mine operation. Canadian Institute of Mining, Metallurgy y Petroleum, 2013.
- [25] Tecnología Minera. *Minería 4.0: Modernización de sistemas de ventilación en la minería subterránea*. Consultado el 25 de junio de 2025. 2024. URL: <https://tecnologiaminera.com/noticia/mineria-40-modernizacion-de-sistemas-de-ventilacion-en-la-mineria-subterranea-1740520697>.
- [26] U.S. Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2010*. U.S. Geological Survey. Rare Earth Elements Global Supply and Demand Visualization. 2010. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>.
- [27] Sergey A. Zhironkin y Dawid Szurgacz. “Mining Technologies Innovative Development: Economic and Environmental Drivers”. En: *Energies* 14.24 (2021), pág. 8590. DOI: 10.3390/en14248590.

A. ANEXO

A.0.1 PLANOS

Se incluyen planos que permitan replicar el prototipo. Los planos acotados buscan, únicamente, que las medidas de las diferentes partes del prototipo modeladas sean conocidas.

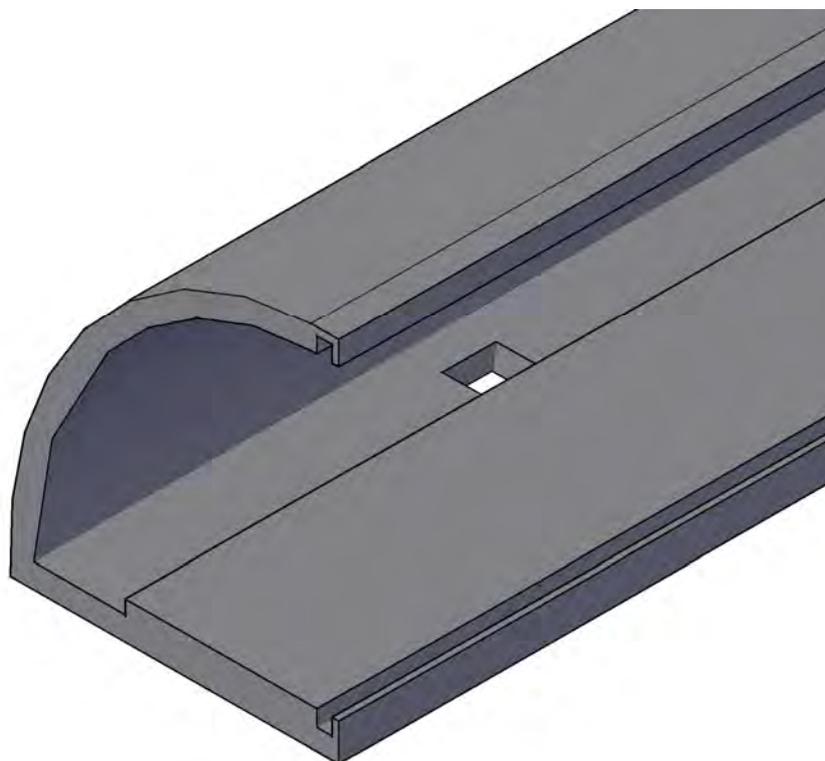
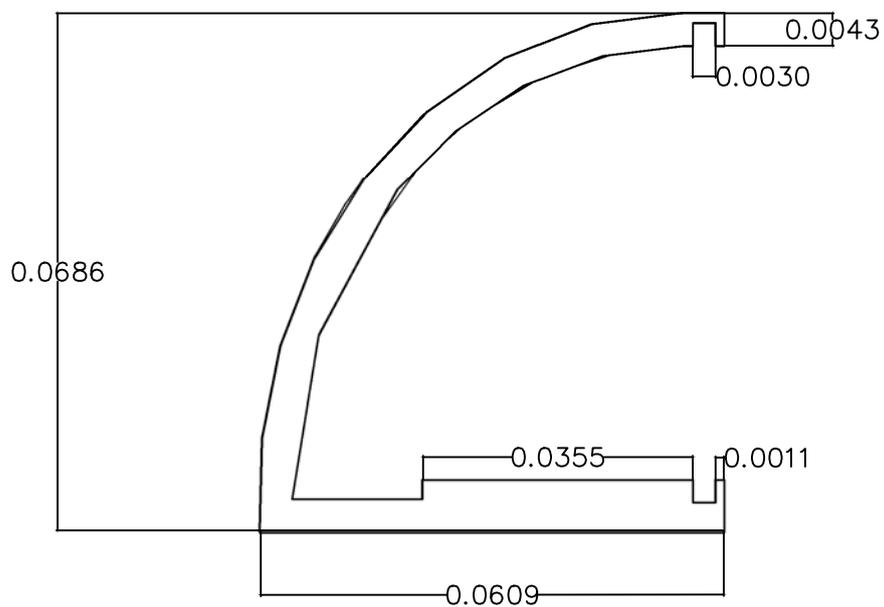


UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESUCELA POLITÉCNICA DE MINAS
Y ENERGÍA

Título del plano: Boceto del prototipo

Autor: Juan Arruzas Insua Tutor: Luis Vejo Fernández

Proyecto final de grado

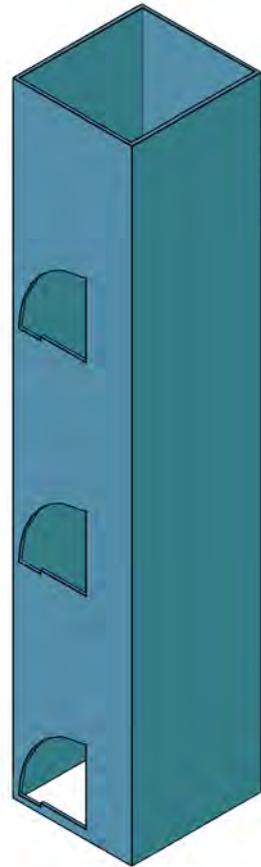
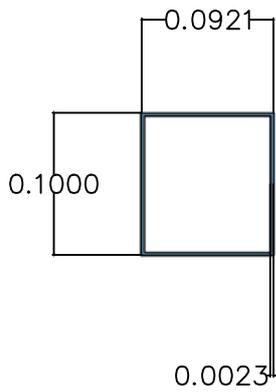
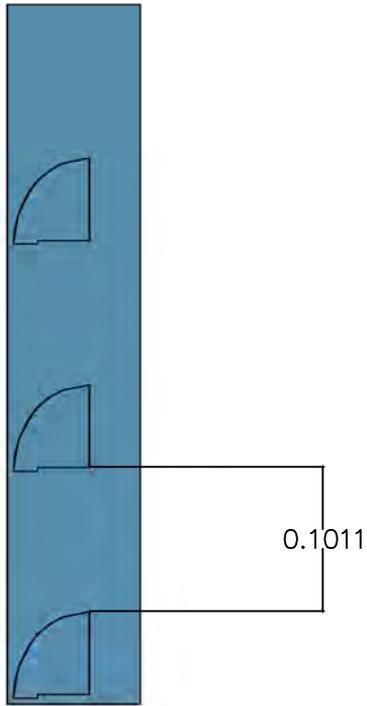


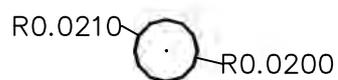
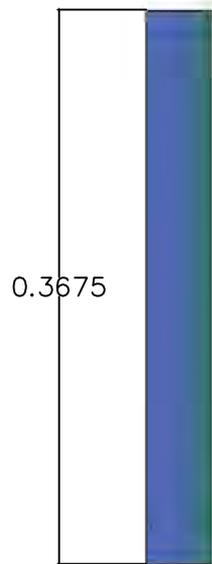
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESUCELA POLITÉCNICA DE MINAS
Y ENERGÍA

Título del plano: Sección de las galerías

Autor: Juan Arruzas Insua Tutor: Luis Vejo Fernández

Proyecto final de grado





UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESUCELA POLITÉCNICA DE MINAS
Y ENERGÍA

Título del plano: Pozo de aire viciado

Autor: Juan Arruzas Insua Tutor: Luis Vejo Fernández

Proyecto final de grado

PANEL DE CONTROL



ESCUELA POLITÉCNICA
DE MINAS Y
ENERGÍA



PROTOTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO
DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA
AUTOR: JUAN ARRUZAS INSUA
TUTOR: LUIS VEJO FERNÁNDEZ

MEDICIONES EN TIEMPO REAL

T^º

Humedad

Gas

Advertencia sonora

Limite

Medición actual



VENTILACIÓN PRINCIPAL

VENTILACIÓN AUXILIAR

ON



ON



La ventilación principal comenzará en cuanto se se detecte la presencia de personas.

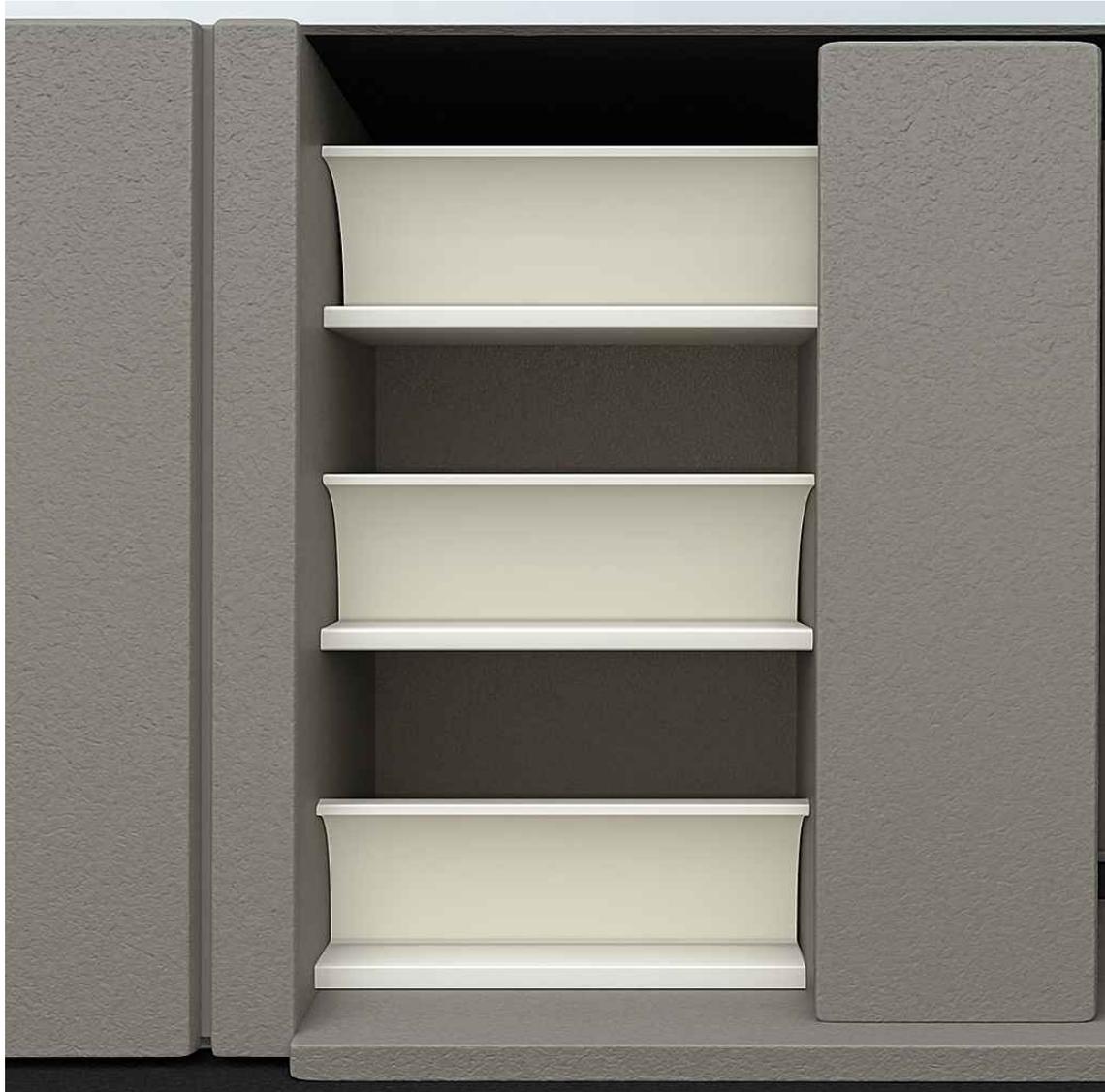
El ventilador auxiliar se activará en caso de que se supere uno o varios de los niveles límite, y se activará la alarma.

El monitoreo será continuo y el sistema actuará de forma autónoma.



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESUCELA POLITÉCNICA DE MINAS
Y ENERGÍA

Título del plano: Panel de control del prototipo
Autor: Juan Arruzas Insua Tutor: Luis Vejo Fernández
Proyecto final de grado



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESUCELA POLITÉCNICA DE MINAS
Y ENERGÍA

Título del plano: Parte inferior del prototipo
con galerías

Autor: Juan Arruzas Insua Tutor: Luis Vejo Fernández

Proyecto final de grado



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESUELA POLITÉCNICA DE MINAS
Y ENERGÍA

Título del plano: Parte superior durante
el montaje

Autor: Juan Arruzas Insua Tutor: Luis Vejo Fernández

Proyecto final de grado

A.0.2 ARCHIVOS .STL Y CÓDIGO

Por motivos de formato y tamaño, y con el fin de que el modelo pueda ser recreado, los modelos tridimensionales diseñados que fueron impresos han sido almacenados en formato STL en una carpeta compartida mediante Zenodo, un repositorio digital de acceso abierto, financiado y en colaboración con la comisión europea y respaldado por la UE. Para acceder a ello, se ha generado tanto un enlace como un código QR.

- Enlace <https://doi.org/10.5281/zenodo.15756772>
- Código QR



Figura A.1: QR con acceso a los archivos .stl

Se realiza lo mismo con los Códigos de Arduino

- Enlace <https://doi.org/10.5281/zenodo.15807822>
- Código QR



Figura A.2: QR con acceso a códigos de Arduino IDE